各種工業製品の環境配慮設計・運用技術に関する研究

A Study on Design and Operation for Environment of Industrial Products

2006 年 2 月

小野田　弘士

各種工業製品の環境配慮設計・運用技術に関する研究

A Study on Design and Operation for Environment of Industrial Products

2006 年 2 月

早稲田大学大学院理工学研究科
機械工学専攻　熱工学研究

小野田　弘士

目　次

第 1 章　序　論 1-1
1．1　**本研究の背景と必要性** 1-1
1．1．1　環境配慮型社会の構築に向けた社会的動向 1-1
1．1．2　環境配慮設計を巡る動向と従来研究 1-1
1．1．3　LCA を巡る動向と従来研究 1-7
1．1．4　環境効率 (Eco-Efficiency) 1-12
1．1．5　汎用産業機器・営業機器における環境配慮設計・運用への取り組み 1-13
1．2　**本研究の目的** 1-22
1．3　**本論文の構成** 1-24
第 2 章　易解体性定量評価手法の開発 2-1
2．1　**目的** 2-1
2．2　**分解性評価指数の定義** 2-1
2．3　**分解性評価指数による解体解析** 2-2
2．3．1　解体試験方法 2-2
2．3．2　解析方法 2-3
2．3．3　解体試験の対象製品 2-5
2．3．4　解体解析結果 2-6
2．3．5　家庭用ミシンの解体解析 2-12
2．3．6　車いすの解体解析 2-19
2．4　**分解性評価指数の高度化** 2-30
2．4．1　解体データに基づく製品の類型化の試み 2-30
2．4．2　各指数の決定方法 2-33
2．4．3　分解性評価指数と実解体時間の関係 2-36
2．5　**解体支援ソフトウェアの開発** 2-37
2．5．1　基本コンセプト 2-37
2．5．2　ソフトウェアの構成要素 2-37
2．5．3　ブラウザ設定のコンセプト 2-44
2．5　**まとめ** 2-46
第 3 章　環境負荷評価手法の開発 3-1
3．1　**目的** 3-1
3．2　**基本概念** 3-2
3．3　**E2-PA の構成要素と各資源強度の定義** 3-3
3．4　**各資源強度の算出方法** 3-4
3．4．1　資源強度換算原単位の算出 3-4
3．4．2　物質資源強度 (MI: Material Intensity) 3-5
3．4．3　エネルギー資源強度 (EI: Energy Intensity) 3-5
3．4．4　有害物質資源強度 (HI: Hazardous Intensity) 3-6
3．4．5　再生資源強度 (RI: Recovery Intensity) 3-8
3．5　**E2-PA における効用の評価** 3-11
3．5．1　効用を評価する目的 3-11
3．5．2　効用の考え方と評価方法 3-11
3．5．3　効用の評価事例 3-12
3．6　**E2-PA による統合評価** 3-15

3．7　**まとめ**.....3-19
第 4 章　環境配慮型汎用ポンプの設計とその評価.....4-1
4．1　**目的**.....4-1
4．2　**環境配慮型汎用ポンプの設計**.....4-1
4．2．1　環境配慮型汎用ポンプの設計のコンセプト.....4-1
4．2．2　具体的な設計の改善点.....4-2
4．3　**分解性評価**.....4-6
4．3．1　解体試験方法及び評価方法.....4-6
5．3．2　評価結果.....4-7
4．4　**E2-PA による環境負荷評価**.....4-9
4．4．1　評価シナリオ.....4-10
4．4．2　各工程のデータの算出方法.....4-12
4．4．3　評価結果.....4-16
4．5　**“成長”する製品の効果の確認**.....4-18
4．6　**まとめ**.....4-20
第 5 章　特殊 IC タグを用いたライフサイクル管理システムの開発とその応用による運用の高度化.....5-1
5．1　**目的**.....5-1
5．2　**ライフサイクル管理を目的とした特殊 IC タグシステムの開発**.....5-2
5．2．1　特殊 IC タグシステムの概要と構成要素.....5-2
5．2．2　特殊 IC タグの記録情報.....5-3
5．2．3　詳細設計.....5-5
5．3　**運用情報管理システムの有効性の検討**.....5-13
5．3．1　特殊 IC タグ記録情報の有用性.....5-14
5．3．2　特殊 IC タグシステムによる省エネルギー診断の効率化.....5-15
5．3．3　性能劣化・故障状態の検知における有効性の検討.....5-22
5．3．4　使用履歴の予測における有効性の検討.....5-27
5．3．5　運用情報管理ソフトウェアの開発.....5-30
5．4　**自動販売機の運用の高度化**.....5-32
5．4．1　特殊 IC タグによる運用情報取得のシミュレーション.....5-33
5．4．2　自販機の省エネルギー診断.....5-38
5．4．5　E2-PA による運用段階の LCA.....5-40
5．4．3　消費電力量の予測式の構築.....5-42
5．4．4　配置の適正化による省エネルギー効果.....5-45
5．5　**まとめ**.....5-49
第 6 章　結論および今後の展望.....6-1
6．1　**結　論**.....6-1
6．2　**今後の展望**.....6-3
6．2．1　環境配慮設計の定量評価手法について.....6-4
6．2．2　LCA の応用について.....6-4
6．2．3　環境情報管理システムについて.....6-6
謝辞.....謝辞-1
参考文献.....参考文献-1
研究業績.....研究業績-1

第 1 章

序　論

第 1 章　序　論

1．1　本研究の背景と必要性

1．1．1　環境配慮型社会の構築に向けた社会的動向

大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済システムが進行している我が国をはじめとする先進諸国においては，廃棄物のリサイクル処理・処分が社会問題となっており，環境配慮型社会の構築が急務となっている．このような喫緊の状勢の中，我が国において 2000 年は，資源循環型社会形成基本法案やグリーン調達法をはじめとする 6 つの法律の制定・改定が行われ，資源循環型社会元年として記憶されるようになった．これらのうち，循環型社会形成推進法の中では，生産者が，自ら生産する製品などについて使用され，廃棄物となった後まで一定の責任を有する拡大生産者責任（Extend Producer Responsibility, EPR）の一般原則が確立された．こうした背景から，各種の製造事業者では，3R，すなわち，Reduce（廃棄物の発生抑制），Reuse（製品・部品の再使用），Recycle（再資源化）を考慮した設計手法の導入が要請されている．

一方，エネルギーの使用に起因する二酸化炭素等の温室効果ガスの排出による地球温暖化も人類の生活基盤に影響を及ぼす恐れがある重大な問題となっている．1998 年 10 月に制定された「地球温暖化対策推進法」では，省エネ・省資源を一層推進するべく各主体に対する温暖化防止に対する責務が明記されている．また，1979 年に制定され，1999 年 12 月に改正された「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（改正省エネ法）においては，自動車やエアコン，冷蔵庫などの指定機器に対する省エネルギーの基準目標に関して，いわゆるトップランナー方式が本格的に導入されることとなった．こうした背景から，新しい省エネルギー技術の開発のみならず，ESCO（Energy Service Company）事業のように，施設や機器等の省エネルギーを第三者が診断し，支援するという新しいサービス業も行われるようになってきた．

以上のように，工業製品の設計・製造，使用・運用，廃棄・リサイクル等のライフサイクル全般にわたって環境に配慮した取り組みを行うことの重要性が増している．

1．1．2　環境配慮設計を巡る動向と従来研究

(1) 環境配慮設計の要点

環境配慮設計とは，「製品のライフサイクル全般にわたって，環境への影響を考慮した設計」であり，英語で Design for Environment，略して DfE とも呼ばれる．同じようなアプローチに関する言葉としては，環境適合設計[1),2)]，エコ・デザイン[3)]，3R 配慮設計等がある．

1992 年に，アメリカで開始された DfE プロジェクトは，ビジネスの様々な分野との自主的なパートナーシップにより実施されている．その目的は，製品設計，製造工程，調達，その他の経営上の意志決定に，環境への配慮を取り入れることである．ここで「意志決定」という言葉が DfE の特徴をよく表している．当然，このプロジェクトの成果は企業における決定権のある人たちに届くよう

になっている．管理職や設計技師，調達担当者などの伝統的な意志決定プロセスの中に環境配慮を取り入れさせようということが本来の狙いである．

このような考え方からもわかるように，環境配慮設計とは，単に「設計」という言葉から受ける印象だけではなく，調達，製造手法，廃棄物管理なども含むマネジメント活動全般をターゲットとした広い概念であるということができる．

環境配慮設計という考え方が生まれてきた背景には，環境保全に関する次のようなパラダイムシフトがある．

まず, 1950 年代から 1980 年代は, 公害がクローズアップされた時代である．工場からの排水や排気が河川，大気，土壌を汚染し，これが人体に影響を及ぼす犯人は近くの工場であることが多かった．そこで，工場の排出口での汚染物質の濃度基準を設ける法規制が制定され，行政はこれを監視し，あるいは立ち入り検査して環境への汚染物質排出量を下げていった. これに対応するために，工場側は排水処理施設や廃棄物処理施設を設け，濃度を下げて排出するように工夫したのである．このようなアプローチを EP（End of Pipe）という．排出管の先で対策するという意味である．

しかし，1990 年代になって，環境科学の発展とともに，かつては無害とされていた物質が次々と有害認定されるに至り, この End-of-Pipe アプローチはさらに新しい処理設備の投資を必要とした．環境保全コストが経営を圧迫し始めたのである．そこで，1990 年代の経営者はもっと効率のよい環境保全手法を模索するようになった. 考え方は実にシンプルであり,「臭いは元から断たなければだめ」とよく言われるように，パイプの先ではなく，原因に遡って対策すればよいのである．これを CP（Clean Production）と呼ぶ．EP と比較すると CP には様々なメリットがある．まず，処理施設が不要，または規模を縮小できる．さらに発生源を断つためのプロセス改良は，不思議と多くの場合，材料コストの低下や効率の向上をもたらす．また，不要な有害物質の使用を避けることができれば労働安全面のリスクを低減させる．有害な物質を代替させるところまでいかなくても，有害な物質をプロセス内で回収再利用するという方法だけでも効果は大きい．このようなものに例えば，重金属類がある．重金属類は排水処理施設で処理すると特別産業廃棄物の汚泥となってしまい，ゴミとしての処理コストも大変高価である．一方，材料として購入する際にもけして安い材料ではない．そこで，プロセスで回収して再利用できれば，材料費，廃棄物処理費，処理施設費用の 3 つが大幅に削減されるので，仮に回収装置にコストがかかっても十分に見合った効果が得られる [2)].

環境に配慮した製品として設計する上での要点は，不可逆過程の程度の縮小と無秩序さの改善，すなわち統一化，統合化，簡素化，省エネ化であり，具体的には素材，部品，製品の各レベルにおいて Fig.1.1 に示すような対応が考えられよう [4)].

すなわち，素材レベルでは，使用物質の量を減じること，可能な限り同一の素材を用いること，混合しても再資源化に支障ない素材の組合せを選ぶこと，製品内にあって同一素材部を偏在させること，再生可能材料を使用することな

どである.

また，部品レベルにあっては，再利用やリサイクル処理の容易性から少数化（モジュール化），規格化，標準化やできるだけ分離させやすい結合方法の採用が望まれる.

さらに，製品レベルでは，部品の統合によって再利用や再資源化が可能な部分を取り出しやすくするとともに，解体の方向性への配慮や使用工具の低減，接合箇所の減少やその方法の改善を通じて，できるだけ解体しやすくすることが重要である．解体しやすい接合方法としてはスナップフィットが注目されている．このほか，リサイクル可能なものにはその素材がわかるようにマーキングすること，輸送・運搬が容易なように大型の製品にあっては分割できる構造とすること，破砕・選別・焼却といったリサイクルおよび処理方式に適するように難破砕部品を事前に取り出しやすくしたり，焼却の際に二次汚染物質が発生しないような配慮が必要である．また，複写機のように製品使用時に再生紙の使用が図れるような機能を付加することも環境配慮設計としては重要である.

こうした低エントロピー化の方策は 3R のみに寄与するものではなく，従来からの目標であった設計・生産における効率化にも貢献するものが多い．例えば,モジュール設計･生産方式は組立作業性の改善や生産リードタイムの短縮，自動化・品質保証での有効性から最近注目されており，また，部品やユニットの規格化・標準化も設計や部品管理の負担軽減，生産効率の向上などに寄与できるものとして取り組みが進展している [5].

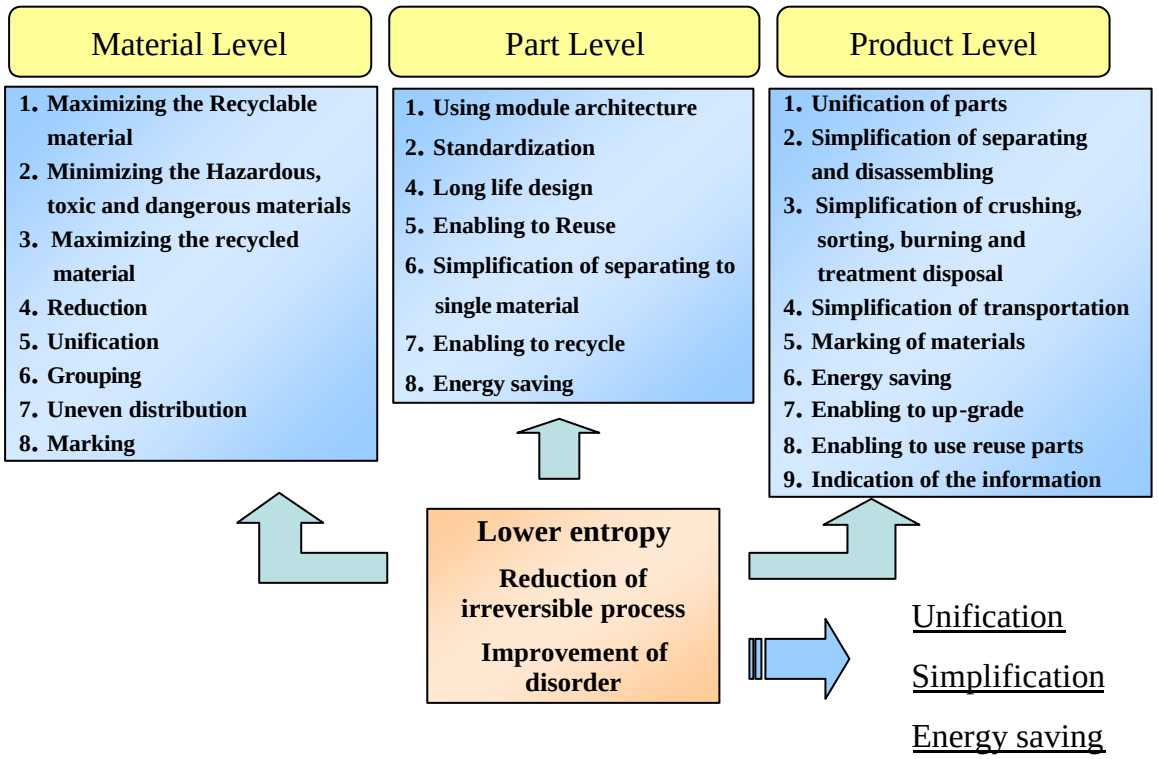


Fig.1.1　Points of DfE (Design for Environment)[4), 5)]

（2）製品アセスメントと環境配慮設計に関するガイドライン

こうした環境配慮設計を広範に推進していくためには，これらの効果を確実に評価し，効率的なフィードバックを行うことが重要である．その代表的な手法として，製品アセスメントが挙げられる．製品アセスメントの概念は極めて大きく，一般的には「製品生産者が生産を行う前に，当該製品の生産・流通・使用・廃棄・再資源化/処理処分の各段階における安全や資源，環境への影響を調査，予測及び評価し，必要に応じて製品設計や生産法などの変更を行って影響の軽減化を図る」ことと定義されている．この中には，すでにテーマとして個別に進行している労働環境の改善，生産や使用時における省エネルギー，環境汚染物質の削減なども含まれることになる．一般的な工業製品に対する製品アセスメントの枠組みを，「生産→流通→使用→廃棄→再資源化/処理処分」の流れに従って図示したのが Fig.1.2 である．各段階のアセスメント内容では廃棄物関連項目を重点的に示したが，このほか全段階に対して安全性，資源保全性及び環境保全性などが検討されなければならない．また，製品の取扱者が適正に処理できるよう，製品表示や取扱説明書の妥当性についても考慮の必要性がある [1]．なお，製品アセスメントに関するガイドラインは，各業界で発行され，環境配慮設計の取り組みがなされている [5), 6)]．

また，海外でもいくつかの環境配慮設計に関するガイドラインが作成されている．海外における代表的なガイドラインを Table 1.1 に示す．ISO（国際標準化機構）が 2002 年に，環境配慮設計のガイドラインとして，ISO TR 14062:2002[7)] を発効した．その序文で，「全ての製品，すなわち，全てのものおよびサービスは，環境に何らかの影響を及ぼし，その影響は，製品のライフサイクルのひとつのまたは全ての段階（原材料の調達，製造，流通，使用および廃棄）で発生しうる．これらの影響は，軽微なものから重大なものまで，さらに短期なものから長期のものまで，また，地方，地域または地球規模までがある（または，それらの複合でもありうる）．」として，「製品設計・開発への環境側面の統合」について記述している．設計の上流段階での環境配慮，製品のライフサイクル全体を考察するライフサイクルアプローチが重要であることを示しており，また，環境配慮についてのみならず，異なる環境要求項目間や環境，技術・品質側面の間に生じるトレードオフについても明らかにすることを要求している [9)]．

IEC Guide 114[8)]は，電気・電子機器に関する環境配慮設計のガイドラインであり，前出の ISO TR 14062 の考え方に基づいて作成された．電気・電子機器の特徴を反映させたガイドラインとなっており，材料効率の改善，有害物質の使用回避，エネルギー効率の改善，機能の最適化等を考慮することの必要性を述べている．

EuP 指令（エネルギーを使用する製品に対するエコ・デザイン要求の設定の枠組みを設けることに関する欧州会議および理事会指令）[9)]では，製品を市場に投入する際に満たさなくてはならない要求事項を規定している．原材料の選択，製造，包装・輸送および流通，設置および保守，使用，エンド・オブ・ライフといったライフサイクル全般にわたって環境配慮設計のパラメータを明記している．さらに，消費者が製品に関わる環境側面を比較できるように，商品

に付属した製品の環境特性やパフォーマンスに関する情報やエンド・オブ・ライフの段階において，解体，リサイクルあるいは処理・処分に関する情報を提供することを求めている点に特徴がある．本指令は，廃電気・電子機器の回収・リサイクルシステムの構築を要求している WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipmet)指令[10]や 2006 年 7 月 1 日以降販売される電気・電子機器について，鉛，水銀，カドミウム，六価クロム，2 種類の臭素系難燃剤（PBB および PBDE）の 6 種類の物質の含有の禁止を規定した RoHS(Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment) 指令[10]とともに電気・電子機器の設計段階における環境配慮のアプローチを規定する流れを示すものであるといえる．以上のように，ISO TR14062 や IEC Guide114 といった，いわゆるガイドラインレベルから環境配慮設計の諸要素を明確な要求事項として規定し，かつ，国際整合を図る“ International Standard ”のニーズがクローズアップされてきている[9]．

こうした背景から，環境配慮設計の要求事項をできるだけ定量化し，設計の改善の効果等を適切に示していくことの重要性が増している．環境配慮設計の評価方法はいくつかの手法が提案されている．従来製品からの改善度を項目ごとに評点法で評価する方法[5), 11)]や使用素材の統一化を構成素材エントロピーで評価する方法[12), 13)]，リサイクル性や安全性から使用素材をランク付けする方法[14)]などが提案されているが，定まった評価方法としては十分なレベルに達しているとはいない．

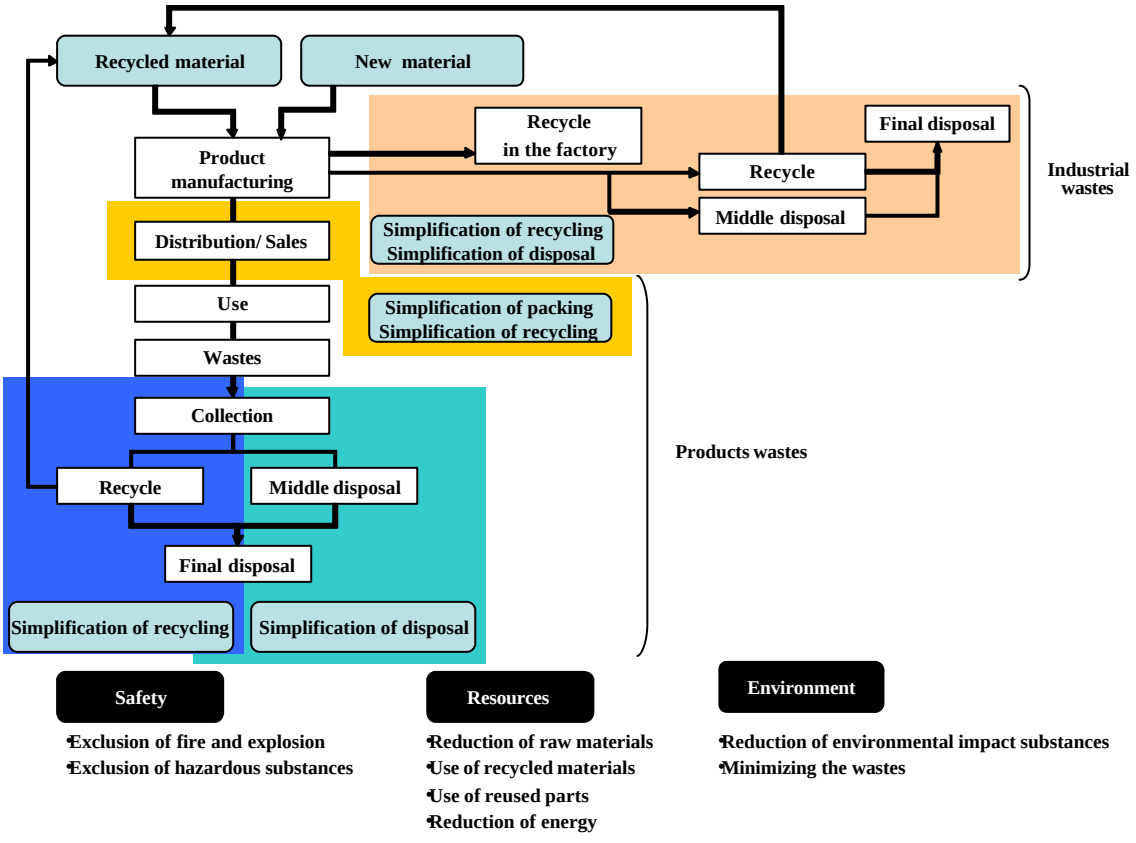


Fig.1.2　Frame of product asessment[1)]

Table 1.1 International guidelines for DfE

Year	Name	Outline
2002	ISO TR 14062	The guide about DfE for integrating environmental aspects into product design and development
2005	IEC Guide 114	Evironmentally conscious design guideline for electrotechnical products based on ISO TR 14062
2005	EuP Directive	Directive about framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products

（3）易解体性の定量評価手法に関する従来研究

リユース，リサイクルを考慮する際に重要となる解体性に対しては，いくつかの評価方法が提案されている．内藤らは，結合方法，使用工具，素材情報等を 10 段階（-5～＋5，大きいほど良好）で点数化し，その合計点で評価する方法を，パーソナルコンピュータを対象に提案している[15]．また，弘重らは，作業者の移動と結合方式の特徴を基本要素として整理し，製品の分解時間が推定可能な分解性評価法（DEM，Disassemblability Evaluation Method）を開発した[16]．さらに，大西らも家電製品を対象に結合方法を評点化（はめ込み：1 点，ボルト・ネジ等：3 点，溶接・接着：5 点）する方法を提案している[17]．

一方，海外でも易解体性に着目した評価事例がみられる．ドイツ技術者協会（VDI，Verein Deutscher Ingenieure）は，結合解除の易難に関するガイドライン[18]を提案している．リサイクルに適した結合要素として定格荷重結合費用，分解費用，リサイクル適性といった観点から 3 段階で評価している．ドイツでは，こうしたガイドラインに基づき，自動車の解体プロセスの分析をメーカーから請け負う事業者[19]も存在する．同事業者では，解体プロセスを行う評価ソフトウェアである DemAP（Demontage Analyse Programm）として公開している．また，Ab Stevels らも結合種類ごとの分解時間を標準化し，製品の解体性を評価する手法を提案している．テレビなどの電化製品を中心に各社の解体時間を比較評価するなどの検討を行っている[20]．以上に述べた易解体性評価に関する従来研究を Table 1.2 に整理した．

以上のように，易解体性評価は，結合方法や分解時間による評価を中心に国内外でいくつかの試みがなされている．しかし，いずれの方法も評価に必要な情報が細かすぎること，あるいは，評価可能な対象製品が限定されてしまうなどの課題が残されている．

Table 1.2 Former study for disassembly assessment method

Year	Developer	Target products	Method or outline
1991	H.Naitoh et al.	Personal Computer	Assessment method of parts separation and disassembly performance for personal computer
1993	VDI	Automobile et al.	konstuieren recyclinggerechter technischer Prokukte
1995	Y.Hiroshige el al.	Home appliance	Development of “Diassembly Evaluation Method (DEM)”
1995	H.Ohnishi et al.	Home appliance	Diassembly assessment method for home appliance
1996	Stevels A. et al.	Electric products	Disassembly modeling method for electronics industry
1999	tec4U inc.	Automobile	Disassembly analysis method “DemAP”

1．1．3　LCA を巡る動向と従来研究

（1）LCA (Life Cycle Assessment)の概要

近年，注目されている LCA (Life Cycle Assessment) [1), 2), 21)]は，製品アセスメントにおける評価項目をできるだけ定量化しようとするものであると理解できる．LCA は，「ゆりかごから墓場まで」製品や技術、サービスの環境や資源等へ与える各種の負荷を定量的に評価する手法である．

LCA は，原料調達から設計・製造，使用，リサイクル及び最終的な処分，つまり，製品等のライフサイクルにわたって，製品等の使用する資源やエネルギーと，それに伴い排出される環境負荷を定量的に推定・評価し，さらに製品に潜在的な環境影響を評価する手法である．製品を例にとると，LCA の概念は，Fig.1.3 のように表すことができる．図に示すように，LCA の対象は，製品のライフサイクルにわたる全ての行為であり，その環境影響も人体や生体さらには空間消費，景観変更など広範な内容に及ぶ．製品を例にとると一般に LCA の構成は Fig.1.4 のように理解されている．以下，同図に示す流れにしたがって，LCA の流れとその概要を説明する．

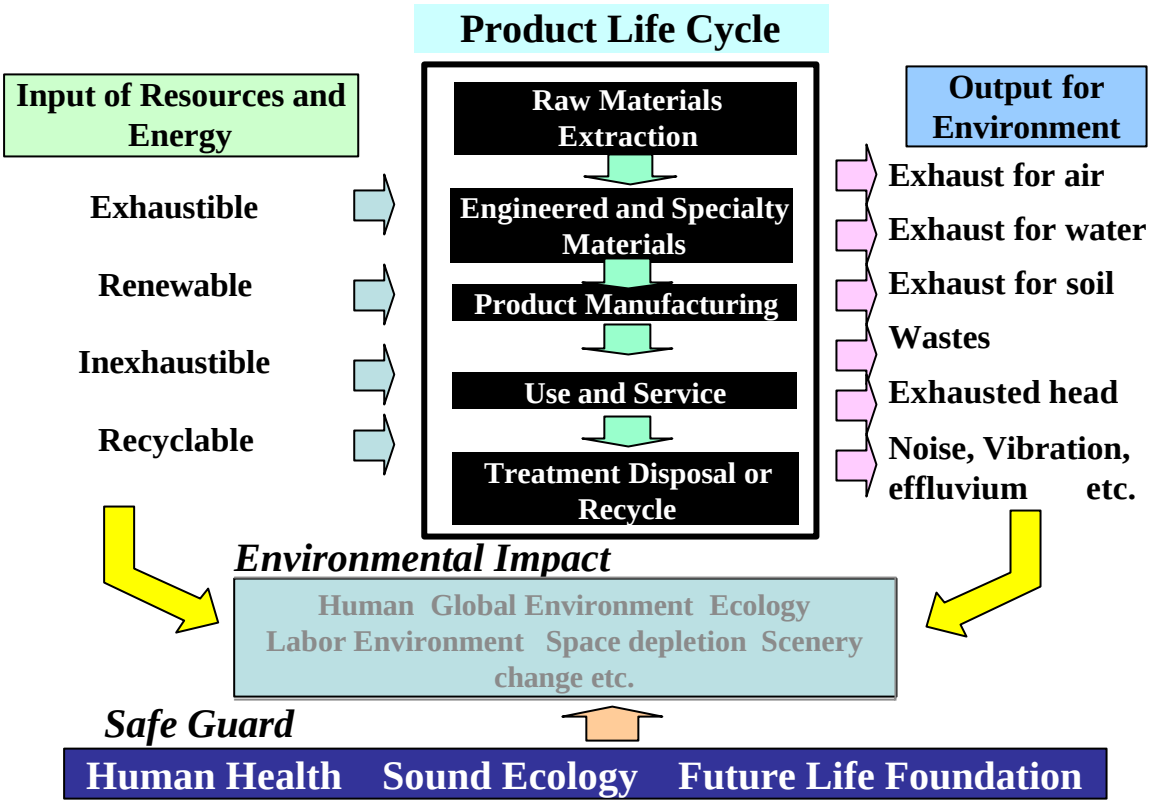


Fig.1.3　Concept of LCA (Life Cycle Assessment)

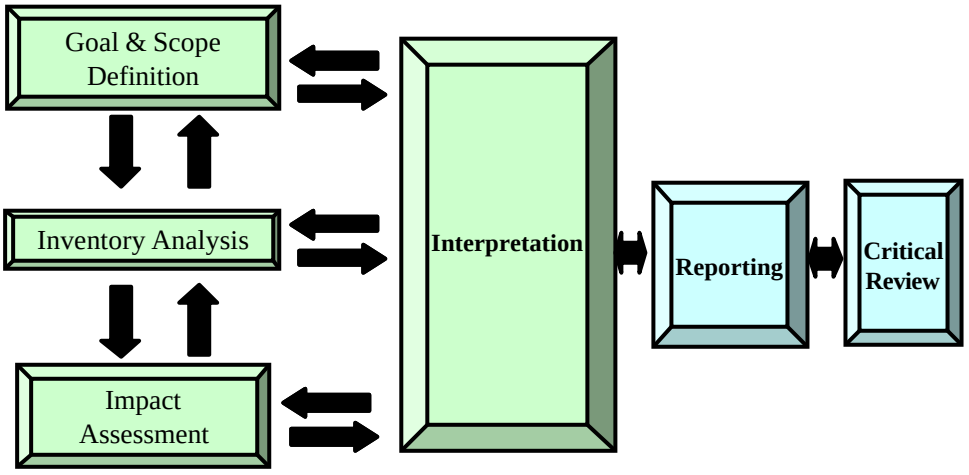


Fig.1.4　Step of LCA practice

(a) 目標設定

目標設定は LCA を実施するうえでの取り組むべき課題や前提を定義し，達成すべき目標を明確にするなど，LCA を行うための条件を設定する段階である．LCA の実施にあたって，その実施の目的，範囲，方法などを明確にする目的の設定と範囲の明確化は最も重要な部分であり，この段階が不明確であると LCA

により得られた結果の客観性そのものが疑われることとなるため，LCA の結果をどのような意志決定に用いるのか，どのような情報が要求されているかなどを慎重に考慮する必要がある．

LCA 実施の目的としては，

① 製品・製法などの変更・改良に伴う環境負荷の評価
② 環境目標値，基準値などに対する達成度の評価
③ 環境負荷低減面からの製品・製法などの改善点の抽出
④ 新規製品の開発などにおける環境負荷などの評価
⑤ 製品間（代替製品も含む）の環境負荷の比較
⑥ 流通・処理・リサイクルなど社会システムの検討評価
⑦ ライフスタイルの評価と改善目標の抽出
⑧ 事業者の環境にやさしい製品づくり，環境を意識した製品づくりの推進
⑨ 消費者への公平な情報の提供

などがあり，とくにどのような目的で，何をターゲットに行ったかを明記する必要がある．

実施の範囲の明確化は，LCA のインベントリ分析，環境負荷影響評価，環境負荷改善評価を実施する範囲を決定するものである．対象範囲として決定すべき事項には，

① 地域的な範囲（国内のみか，海外も含むか）
② 評価の範囲（インベントリ分析のみか，環境負荷影響までを実施するかなど）
③ 対象ステージ（ライフサイクルのどの部分を対象とするか，あるいはライフサイクル全体を対象とするか，リサイクルは含めるかなど）
④ 対象とする環境負荷項目（廃棄物処理問題，地球温暖化，エネルギー枯渇などどの環境負荷を評価の対象とするか）

などがあり，その他必要に応じて実施者が適宜範囲設定する必要がある．

（b）インベントリ分析

インベントリ分析は，調査あるいはデータ収集の過程を示し，対象製品のライフサイクルにしたがい，そこに投入あるいは排出される全ての原材料，エネルギー，生産物，廃棄物などの量を確定し，その一覧表を作成することである．現在までの LCA 事例においてはインベントリ分析[22)]が主体であり，この段階だけを独立させてライフサイクルインベントリ（LCI）ともいわれる．

インベントリ分析の手法は 2 つに大別することができる．ひとつは，「産業連関法」といわれるもので約 500 項目にわたる産業連関表を使用し，部門間の金額ベースのやりとりから特定製品のエネルギー・負荷を算定するもので，マクロなレベルで分析できることに特徴がある．

もうひとつは，ライフサイクルの各段階において投入した資源・エネルギー（インプット）と排出物（アウトプット）を詳細に計算し集計することで全ライフサイクルにおける環境負荷を求めるもので，「積み上げ法」といわれ環境負荷の実体と原因を明確にし，対策の検討と効果を評価できることに特徴がある．以下の説明は，積み上げ法について述べるものである．

（c）インパクトアセスメント

インパクトアセスメントは，インベントリ分析の結果得られた投入排出量を環境への影響として評価する段階で，以下に述べるように分類，特性解析，評価の 3 つのステップから構成される．評価においては，インベントリ分析において明確にした投入排出量をある環境負荷に置き換える手法が大きな課題となっており，環境負荷の項目ごとに統合化する方法や環境負荷全体を統合化する方法が考えられている．現時点では，環境負荷全体を統合的に評価しうる標準的な指標は確立されておらず，インベントリ分析の結果をそのまま個々の負荷に置き換えることや，重み付け係数などを用いて項目ごとに統合化することなどが行われている．以下，インパクトアセスメントの各ステップについて説明を加える．

1）分類

インベントリ分析によって得られた個別項目がどのようなインパクトカテゴリー（環境負荷項目）に当てはまるかを判別する作業である．環境負荷の評価視点としては，地球環境問題と地域環境問題（例えば，地球温暖化，オゾン層の破壊，大気汚染），資源消費の問題と環境負荷の問題（例えば，エネルギー枯渇，資源の消費）などに大きく分けて考えられる．

分類を実施するにあたっては，いくつかの視点から重複的に問題となるインベントリ分析の項目（SOx，NOx→酸性雨，大気汚染）をどう評価するか，因果関係をもつインベントリ分析の項目（森林資源消費→地球温暖化）をどう評価するかなどを明確にしたうえで分類の体系を作成することが必要である．

2）特性解析

特性解析は，分類の結果，インパクトカテゴリーごとに並び換えられた投入排出量について，各々の項目ごとに影響度として計算するステップである．同じ項目に属する環境負荷であっても各々の相対影響度は異なるので，何らかの指標によって重み付けを行ってから集計することが必要である．ある環境への重み付けの例としては，

- 地球温暖化　　→GWP 値（Global Warming Potential）
- オゾン層破壊　　→ODP 値（Ozone Depleting Potential）
- 大気汚染，水質汚濁→環境基準値の逆数

などが考えられる．

3）統合評価

統合評価は，インパクトカテゴリーごとの指標をさらに統合化して，いわゆる環境負荷をひとつあるいは複数の指標で表現しようというものである．複数の代替案を比較する場合に，不明瞭さのない結論を得ることが目的であれば，この段階が必要になる．統合評価については，次項で述べる．

（d）改善アセスメント

改善アセスメントは，インベントリ分析，インパクトアセスメントの結果から，環境負荷などを総合的に改善するための変更点を検討，抽出し，その改善策について検討するステップである．今のところ具体的な手法や内容は確定しておらず，今後の LCA 関連研究の推進や LCA の適用による製品の改良，製品

設計などの実施例の蓄積により,その手法を明確化していくことが必要である.

いずれにしろ，この段階では，インベントリ分析，インパクトアセスメントの結果を総合的に考慮し，どのような点において，どのような改善策が可能かを判断することになる．そして，さらなる検討によって，それぞれの改善策の効果を比較分析し，最終的な結論を導き出すことになる.

（2）LCA 統合評価手法に関する従来研究

環境影響の統合評価を行うことは，評価結果をわかりやすい形で表現する際に重要となる．統合評価方法は，大きく 3 つに分類される．すなわち，基準値換算法（Distance to Target），費用換算法（Manetarization）およびアンケート法（Panel Method）である.

基準値換算法とは，科学的あるいは政治的な環境上の目標に対する乖離度に応じて環境問題の優先順位を決定しようする方法であり，その代表例としてオランダの Eco-indicator 法[23]，スイスの Eco-point 法[24] が挙げられる.

費用換算法とは，環境影響として発生する全てのインパクトカテゴリーへの寄与を，通貨単位で表現し，統合化を行うものである．支払い意思額による評価が一般的であるが,①対策の実施に最大いくら払うか（Willing to Pay），対策が実施されないときいくらの保証が必要か（Wiliing to Accept）という観点から評価する．スウェーデンで開発された EPS（Environment Priority Strategies for Product Design）[25] がこの考え方を導入している.

アンケート法は，環境への影響を改善する優先順位を，アンケート調査を基に相対的に決定する手法である．永田らは 9 つのインパクトカテゴリー（エネルギー枯渇，地球温暖化，オゾン層破壊，酸性雨等）を設定し，本手法によりカテゴリー間のウェイト付けを行い，統合化指標 ELP（Environmental Load Point）[26), 27)]として統合化している．Table 1.3 に代表的な統合化指標の概要を整理した.

Table 1.3 Outline of representative LCA valuation method

Name	Eco Point	Eco-indicator	EPS (Enviromental Strategies in Product development)	ELP (Environemtal Load Point)
Country	Switzerland	Netherland	Sweden	Japan
Developer	BUWAL (Bundesamt fur Umwelt, Wald and Landschaft)	PRe consultants	IVL (Swedish Environemtal Research Institute)	K.Nagata Laboratory,Waseda University
Valuation method	Distance to Target	Distance to Target	Manetarization	Panel Method
Unit	EP	EI point	ELU (Enviromental Load Unit)	ELP
Notes	Eco Factor, a unit environetal load, is determined by political target	The targets are deteramined by scientifically reliable index which represents “damage”.	“Wiilingness to Pay” is considered in the process of valuation.	The Questionnaire is done for some goup and the “category importance” of environemtal problems are determained.

しかし，これらの手法は，客観的か科学的かの判断では疑問を呈されることも多い．この理由としては，どのようなインパクトカテゴリーを重要と考えるかは，国や地域によって，さらにまた各個人によって異なることがあり，異なる環境視点の環境負荷を相互に比較する方法は，社会としての価値観や好みに依存する面もあることが挙げられる．さらに，LCA が多くの環境負荷項目を取り扱う必要があり，空間，時間，質の面で多くのコンフリクトする課題・問題を引き起こすことにもよる．例えば，空間的問題では，オゾン層破壊のような地球規模の問題と地域的な大気汚染の問題のどちらがどのくらい重要かなどの点である．空間的問題では，海外での資源採掘での環境負荷とその国内での消費の関係なども重要である．時間的には，ライフサイクルというように製造時から廃棄時をわたって評価しなければならないが，耐久消費財では廃棄時の負荷は想定に近いものがある．また，地球温暖化のような長期的視点での影響判断が求められるものと一般的な大気汚染のように短期的な視点からの影響が重視されるののどちらがどのくらい重要かとの問題もある．質的には，大きく廃棄物問題とエネルギー問題の関係などが議論になる．こうした点をまとめひとつあるいは少数の指標で表すには，必然的に価値観が絡むことになる．
しかしながら，環境配慮設計を推進する上では，一定の約束ごとを基に標準性・利便性の高い手法が必要とされているといえる．最近の動向としては，ISO14040 シリーズに従い，LCA に基づいた製品およびサービスの定量化されたデータを，資格を有する第三者評価機関が検証・認証する環境ラベルタイプⅢの方式によって情報開示する事例が増えている [28]．

こうした LCA 手法の開発は，前述のように活発に行われているが，環境配慮設計の評価方法と同様，定まった方法は未だ確立されているとはいえない．

1．1．4　環境効率 (Eco-Efficiency)

環境配慮設計を考えるにあたり，近年，注目されている概念として環境効率（Eco-Efficiency）[29]が挙げられる．環境効率とは，環境問題が深刻化してきた 1990 年代初めに提唱された考え方である．環境効率を提唱した WBCSD（World Business Council for Sustainable Development）は「環境効率は，人間のニーズを満たすとともに生活の質を高める製品のサービスを，そのライフサイクル全体にわたる環境への影響と資源の使用量を地球が耐え得る限界以下に引き下げながら競争力ある価格で提供することにより達成される．」と述べている．環境効率は，生産される製品やサービスの価値（利便）とその提供に伴って発生する環境負荷の比で表される．環境効率を表す指標が大きいほど，その製品やサービスは環境にとって望ましいことを意味する．例えば，製品評価を例にすると，次のように表現される [30]．

$$\text{環境効率}=\frac{\text{製品・サービスの価値（便益）}}{\text{環境負荷}} \qquad \text{例：}\frac{\text{製品の機能}}{\text{製品の消費電力}} \qquad (1.1)$$

近年，環境効率に基づく指標によって，製品を評価する事例が家電製品 [31]，

パソコン[32]などを中心に増えてきている．

また，環境効率を比較する方法として「ファクター」という考え方も注目されている．ファクターは，ドイツの研究者ら（ブッタパール研究所　ワイツゼッカー博士ほか）により示された考え方である．「ファクター4」は地球の持続可能な発展を確保するため，現在の平均的生活水準を 2 倍にするのに半分の資源で達成するというものである．下式を基にすると，新製品の環境効率が 4，旧製品の環境効率が 1 でファクター4 と算出される．

$$\text{ファクター}=\frac{\text{新製品の環境効率（例：20YY年又はB生産方式）}}{\text{旧製品の環境効率（例：19XX年又はA生産方式）}} \tag{1.2}$$

単に環境負荷を評価するだけでなく，こうした視点も取り入れながら，総合的に環境配慮性を評価する必要性が高まっているといえる．

以上のように，環境配慮設計の概念は，先進的な取り組みが見られる製品，自動車[5), 33)]，家電製品[5), 34), 35)]，電子・事務機器[5),36)~38)]，レンズ付フィルム[5)]等で先進的に行われている．しかし，従来公開されている環境配慮設計の評価事例は，自社製品の評価にとどまっており，広く公平かつ横断的に評価されている例は見当たらない．したがって，これらの製品においても 3R 性，解体性等に関しては，改善の余地があると考えられる．さらに，LCA も含めて，標準性や利便性の高い評価手法が確立されていないことから環境配慮設計が様々な製品に浸透しているとはいえない．

1．1．5　汎用産業機器･営業機器における環境配慮設計･運用への取り組み

家電製品，OA 機器，自動車，自動販売機などの製品では，解体のしやすさに配慮した設計や素材へのマーキング，解体情報のマニュアル化など様々な試みが行われている．また，これらの業種では，業界団体や個別企業によって，環境への影響を事前評価する製品アセスメントに関するガイドラインも整備されており，先進的な取り組みを行っているといえる．

本研究で代表製品として取り上げる汎用産業機器においても，①機器の小型化における省資源，②運用中の高効率運転による省エネルギー，③適切な保守による性能維持，④使用後の再使用部品の効率的な選別および再使用促進による廃棄物減量化が有効な方策と考えられる．これらを実現するためには，機器のライフサイクルの各段階における種々の情報の有効活用が必須となる．しかし，汎用産業機器においては，その取り組みが他の分野と比較して遅れている面が見られる．その原因として，歴史が長く成熟した産業であり，既存の技術の継承が長年にわたって続いていることと，技術的なブレークスルーがなかなか見出すことができないことが挙げられる．また，汎用産業機器は，同一機種であってもユーザーごとの利用形態が大きく異なることから，その運転状態や機器の劣化状況などを正確に把握することが困難な状況にある．これが機器トータルとしての環境負荷の削減の積極的な推進を妨げる結果となり，さらには使用後の機器状態の不均一さによって再商品化・再利用化の可否判断が困難と

なっている．現在，使用済みポンプを回収し，再販売する事業がまさに始まったところであるが,こうした問題に直面しているところである.しかしながら,前項で述べたような社会的背景から，いくつかの新しい動きが現れつつある．本項では，本研究で代表製品として取り上げる汎用ポンプおよび自動販売機を中心に，その 3R に関連する同行および LCA を含む環境配慮設計および省エネルギー化に向けた取り組みの現状を整理する．

（1）使用済みポンプの再生販売事業

汎用ポンプに代表される汎用産業機器では，一般的な金属を主な材料としているため材料に戻しやすく,家庭用の耐久消費財に比べて使用期間も長いため,リサイクルについては，差し迫った問題は少ないと考えられてきた．これらに対し，汎用ポンプ大手の A 社では，汎用産業機器も本格的な循環型製品を目指すことが不可欠であることを認識し，その第一歩として用途の広い汎用ポンプを対象とした製品の循環システムの導入を検討してきた．そのモデルプラントが，同社 B 事業所内の逆工場であり，1998 年より稼動している [39]．

同社の事業では，使用済みポンプは，ユーザーから回収され，回収拠点へ運ばれる．現在，回収対象地域は，首都圏の 1 都 7 県となっている．その後，使用済みポンプは，B 事業所内の逆工場に運ばれる．そこで，選別され，再使用できないと判断された製品は，マテリアルリサイクルにまわされる．再使用可能と判断された製品は，分解・点検，組立，部品交換，性能試験の各工程を経て，これに合格したものが再生ポンプとして再販対象となる．再生ポンプは，同社の物流センター（都内）に保管されたのち，インターネットを通して販売される．

また，使用済み製品に関する情報は，回収時にユーザーへのヒアリング調査により収集し，カルテデータベースとして管理されている．カルテとは，回収時に製品に付けられる番号のことであり，ポンプの使用経歴，性能試験結果などの情報と併せて管理されている．これらの情報は，再販時にインターネット上で公開される．

現段階で，回収対象となっているのは，清水用の汎用ポンプのみで，取替え需要のポンプを対象に無償で回収している．産業用・汚水用は，逆工場における衛生上の問題から回収対象となっていない. 回収対象ポンプ全体の 85%が汎用陸上ポンプであり，水中ポンプ，他社製ポンプと合わせて年間で 1 万台を回収目標としている．この数字は，首都圏における年間の取替え需要の約 20%に相当するものである. また, 再生販売対象となるのは, 陸上ポンプのみであり,水中ポンプ及び他社製のポンプは全てマテリアルリサイクルに回される．

しかし, これらのうち, 再生販売が可能なのは, おおよそ全体の 25%であり,70%がマテリアルリサイクルとなっており，有効な回収率が得られていないのが現状である．

（2）汎用産業機器・営業機器における LCI・LCA の導入事例

（a）汎用ポンプおよび汎用送風機

我が国では，経済産業省主導のもと，LCA 手法の確立とパブリックデータベース構築のための国家プロジェクト（通称，LCA プロジェクト）1998 年度より

産学官連携体制で進められ, 2004 年にデータベースを公開するに至っている [40].

（社）産業機械工業会では，上記のプロジェクトの一貫として，汎用産業機器の LCI データを収集し，公開する取り組みを行っている．同工業会は，LCI データの収集対象とする代表的製品として，汎用ポンプと汎用送風機を選定とした．その理由としては，製品の構造が標準的なものが多く，データの代表性が期待できること，また，LCA プロジェクトの中で実施されたアンケートにおいて，他の業界，とくに建築業界から LCI データの具体的ニーズとして挙げられたことなどが挙げられている．

具体的には，一般的に使用され販売台数が比較的多く，標準的な構造を有している横形遠心ポンプ（口径 80mm，5.5kW，4 極），片吸い込みシロッコファン（2.2kW，4 極,）を代表例として，LCI データの収集がなされた．同調査では，製造工程に限定して，データを収集しているが，その分析を行った結果，原材料，電動機等の部品，副資材等の製造に起因する環境負荷と，工場内における電力・燃料などに起因する環境負荷が大きいことが判明した．以上の結果から，環境負荷の削減に向けての指針としては，原材料や部品などの使用量の削減や工場内の電力や燃料などの省エネが効果的であるとの結論を得ている [41)〜43)].

さらに，汎用ポンプに関しては，インベントリ分析にとどまらず，より総合的な製品の LCA を汎用ポンプに導入した事例 [44)]がある．ここでは，従来製品と省エネ型の新製品（以下，新製品という）の環境負荷を「資源採取」から「使用段階」までを評価している．その結果，汎用ポンプにおいては，使用・運用段階の電力消費に起因する環境負荷が製造や輸送などの他の段階と比較して圧倒的に大きいことが明らかとなった．これは，汎用ポンプが，エネルギー消費型の製品であり，その寿命が長いことに起因するものである（同評価では，ポンプの設置期間を 15 年間と想定している）．これにより，汎用ポンプのライフサイクルにおける環境負荷の低減を考慮するにあたっては，使用段階における省エネルギー化が最も重要であると指摘している．また，新製品は，従来製品と比較して，使用段階における環境負荷を約 20%低減しており，その省エネルギー効果の有効性が定量的に示されている．

（b）自動販売機

一方，営業機器である自動販売機においても LCA が実施された事例がある．木村ら [45)]は，CO_2 排出量のインベントリ分析および加藤らが開発した環境負荷統合化指標 LCA-NETS[46)]を自動販売機に適用し，その環境負荷分析を実施している．その結果，自販機では，長期間にわたる使用段階での CO_2 排出の比率が非常に高いことを示しており，一層の省エネルギー化への取り組みの必要性を示している．また，統合評価では，自販機の環境負荷の約 9 割を材料調達段階と使用段階が占めることがわかり，前者に対しては，材料使用量の低減，環境負荷の低い材料の選択，部品リユースや材料リサイクルが，後者に対しては，省エネルギー化が重要であることを明示している．

自販機では，汎用ポンプ等とは異なり，製品アセスメントの実施や 3R への取り組み，環境配慮設計の導入がメーカーによって先行的に実施されている．

したがって，自販機における環境配慮を推進していくには，省エネルギー化への取り組みが重要であるといえる．

（4）省エネルギー化への取り組み

以上のように，汎用ポンプおよび自販機では，LCA 的な観点からも使用・運用段階における環境負荷低減が必要であることを示した．以下，汎用ポンプおよび自販機におけるこれまでの省エネルギー化に向けた取り組みを示し，とくに着目すべき点を抽出する．

（a）汎用ポンプの省エネ診断システム

A 社において行われている省エネ診断システムは，汎用ポンプのうち最も運転時間が長く，省エネルギー効果が高い循環ポンプをターゲットに絞っている．循環ポンプは，下記理由により無駄を生じやすい．

- 設備の最大負荷点を基準にしたポンプ選定
- 配管損失の算出時に見込まれる余裕
- ポンプ選定上の制約（在庫品の中から要項を上回るポンプを選定する）

以上のような理由により，実際のポンプの運転では，必要以上の過大流量・過大電力で使用されることになる．循環用途においては，これらの集積が平均で 35%，甚だしい場合には 50%の無駄となっていることがわかってきた．省エネの決め手は，「真」の要項（現地で運転してみることで初めてわかる必要最小限の流量・揚程，Fig.1.5 参照）にポンプの運転点を一致させ，無駄のない「効率点運転」を行うことである．

A 社による省エネ診断システムは，以上の点に着目し，インバータによる回転数制御による省エネ効果を試算するものである．

回転数制御により，減速運転すれば消費電力が減少することはよく知られている（回転数の 3 乗に比例する）．A 社における省エネ診断システムでは，以下の点を特長として挙げている．

- 流量計不要の簡便システムであり，短時間で多数のポンプを診断可能．
- 診断時に設備停止不要．
- ポンプ試験表が入手できない場合であっても，実用上問題のない診断が可能．

同システムでは，圧力計・連成計及び電力計により，ポンプ吐出し圧力・吸込み圧力と消費電力を測定する．これを PC に入力すると，①ポンプ特性特定，②運転点特定，③適正回転数シミュレーション，といったフローを経て，診断結果が出力されるようになっている．出力データは，計画要項点（流量）に対して，実際の流量（圧力）がどの程度上回っているかを図示するとともに，インバータで減速した場合の省エネ効果（電力削減量），及び CO_2 排出量の推移を図表によって提示する．また，ポンプ試験表を入手できなかった場合を想定して，口径・回転数・軸動力・要項（流量・全揚程）など銘板に記載された情報のみで特性が推定可能なプログラムを有している [47]．

A 社では，以上のような手法を用いて，省エネ診断を行ってきているが，汎用ポンプにおいては，平均的に Table 1.4 に示すような省エネ率，すなわち，省エネルギーの「ポテンシャル」があると試算している [48]．用途によって省エネ率に差があるのは，省エネ率が全揚程に占める配管損失の比率によって決定さ

れるからである．設備に必要なポンプの全揚程の内訳は，

全揚程=実揚程＋配管損失　(1.3)

で表される（Fig.1.5 参照）．この内訳の比率により，一般的に次のように区別される．

損失水頭（配管損失）型設備：配管損失≫実揚程

実揚程型設備：実揚程≫配管損失

前者が「循環用」であり，後者が「揚水用」に相当する．「送水用」は両者の中間ということになる．これらを整理したものを Table 1.5 に示すが，配管損失の全揚程に占める割合でみると平均的に，循環用では 1.0，送水用では 0.5，揚水用では 0.2 となる．循環用のように，この割合が高いほど「無駄な運転」をしている可能性が高く，省エネ効果が高いということを意味する．冒頭で述べたように A 社が循環用にターゲットを絞って省エネ診断を行っているのはこうした理由によるものである．

こうした実態，とりわけ Table 1.4 に示した省エネの「ポテンシャル」は，様々な場所で使用されている汎用ポンプは，「エネルギーの無駄」を生み出していることを意味する．これまで述べてきたように，省エネ診断自体のプロセスは，おおよそ確立されているといってよい．しかしながら，そのデータ収集の労力とそれに伴い生じるコスト面の課題が残されていることから十分に普及しているとはいえない状況である．

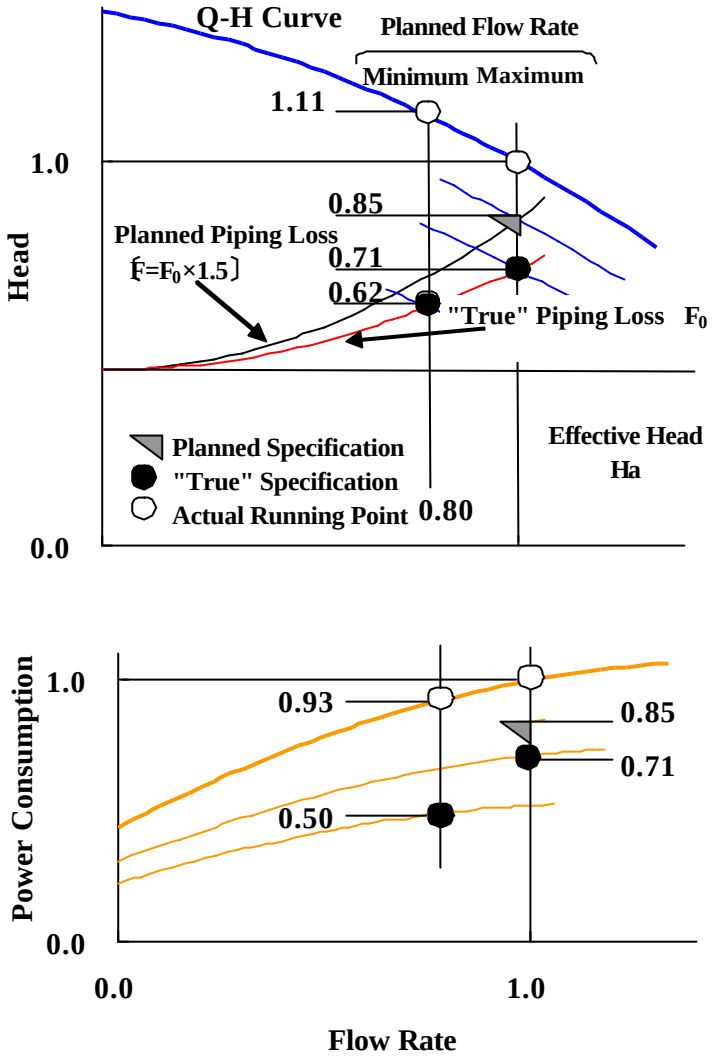


Fig.1.5 Energy-Saving effect by elimination of idle pump operation[45)]

Table 1.4 Estimation of general-purposed pump's energy-saving rate

Use	kW Standard		Specification Standard
	1.5～15kW	18.5～75kW	-
Cycling	35%	30%	25%
Circulating	25%	20%	15%
Lifting	10%	10%	-

Table 1.5 Rate of piping loss to total head on general-purposed pump's use

Use	Rate of Piping Loss to Total Head* $H_l / H_T = H_l / (H_l + H_a)$
Cycling	1.0
Circulating	0.5
Lifting	0.2

* H_l : Piping Loss　H_T: Total Head　Ha: Effective Head

（b）自販機における省エネルギー技術の開発

自販機においては，学習省エネ機能の搭載やピークカット運転，断熱材の改良など各種の省エネ対策の導入がなされてきており，その結果，JIS 規格に基づく試験によれば，自動販売機の消費電力量は，ここ 10 年間で 60%を越える削減率を実現している [49].

自動販売機には，売上状況等を自動的に検知し，省エネ運転を行う機能が備わっている．その代表的な機能を以下に示す.

- オート･エコ機能（学習省エネ機能）: 自販機が設置先の状況を検知･学習し，飲みごろ温度を保ちながら最適運転を自動的に行う機能.
- 深夜停止機能：夜間の販売量が少ない設置先では，蛍光灯と冷却装置を深夜にストップする．蛍光灯と冷却装置を個別に設定することも可能である.
- ファンモータの DC 化：直流電源増設が不要で AC 入力タイプの DC ブラシレスモータを庫内ファンモータとして採用することで，変換ロス･発熱ロスを減らし効率よく高電圧で駆動し，モータでの消費電力を削減する.
- 蛍光灯調光：インバータの利用は，入力を同じとすると安定器方式に比べ，エネルギーの損失が少なく，蛍光管中の電子の量が約 1.2 倍に増えるため明るくなる.
- ピークカット機能（エコベンダー）：夏期(7～9 月)の電力消費のピーク時間帯である 13 時～16 時に冷却運転を停止し，この間の消費電力をカットする．ただし，午前中に通常より低い温度に商品の冷やしこみを行う．この機能は電力負荷の平準化に貢献する.

実際の自動販売機の運転における深夜停止およびピークカット機能の発現の様子を Fig.1.6 に示す.

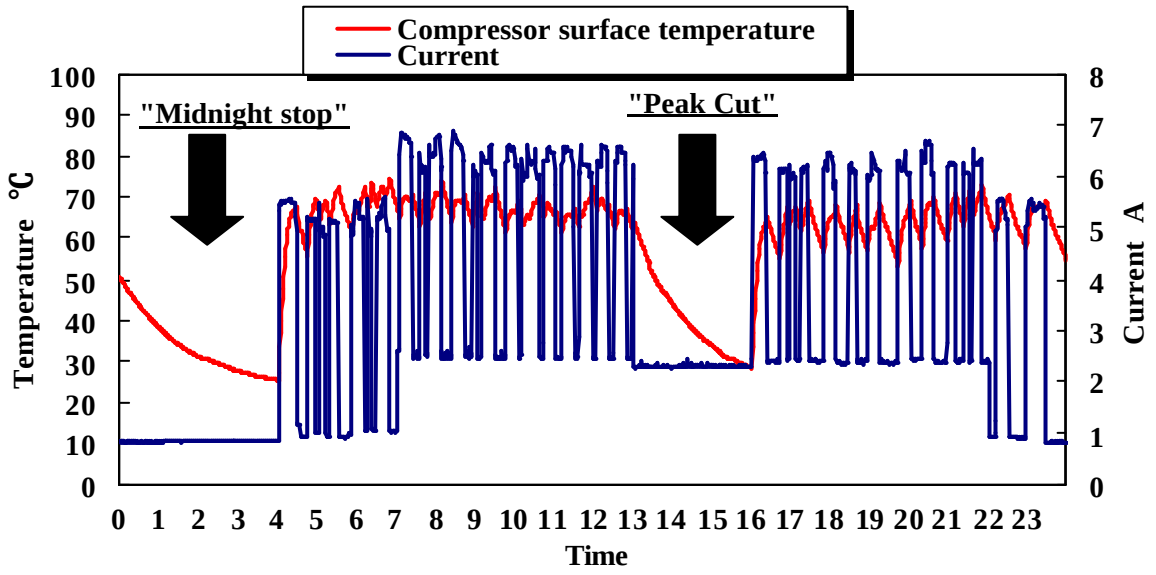


Fig.1.6 An example of “Auto-eco” function

（5）総合的なライフサイクルシステムの必要性

さらに，これまで述べてこなかったが，ライフサイクル全般を総合的に管理するシステムの構築も製品のライフサイクルにおける環境負荷低減を図る上では，極めて重要である．すなわち，機器の設計・生産・運用段階における情報を管理・収集した上で解体・分別・リサイクル工程へと導くプロセスが極めて重要となる．機器の運用中の運転状態および保守・管理情報は，解体・分別工程での作業に有用となるだけでなく，設計段階での部品や素材選定にもフィードバックできる可能性を有する．

しかしながら，このようなシステムが構築されている製品は，ほとんど見当たらない．設計・段階における省エネルギー型の製品の開発や 3R に配慮した設計手法の導入，ESCO 事業に見られるような使用・運用段階における省エネルギー化に向けた取り組み，各種リサイクル法の施行により要請されている適正な使用後処理など，ライフサイクルの各段階での個別の取り組みは行われているものの，それを一貫した情報管理に基づいて実施されている仕組みは整っているとはいえない．これまで，解体・リサイクル段階における素材選別などの効率化を図ることを目的に，家電製品や自動車などでは RFID タグのような媒体を用いて，製品情報を管理するシステムが検討された事例[50]が報告されているが，使用済みとなった製品や特定のメーカーの管理に特化しているなどシステム自体が限定的であり，実用化には至っていない．

こうした観点からすると，複写機の部品リユースの事例[33]は，ライフサイクル管理システムを構築した先行事例であるといえる．複写機業界では，自社製品を回収し，使用履歴に基づく検査・診断工程を経て，リユース部品を生産ラインに投入する取り組みを行っており，循環型システムを構築した代表的な例として知られている．しかし，複写機では，リース・レンタル方式による販売形態や製品寿命が比較的短いことなど，製造事業者が循環システムを構築するにあたって有利な条件を有していたといえる．

したがって，本研究で代表製品として取り上げる汎用産業機器・営業機器のように，現状では製造事業者の管理が行き渡らない製品に関しては全く異なるシステムが必要となる．

本研究開発で対象とする汎用ポンプ全体の出荷台数は年間 350 万台以上にものぼるが，現在のところ環境配慮設計の導入や運用中の省エネ性を積極的に推進する方策が取り入れられている例はごくわずかであり，とくにメーカー側は機器販売後の使用や廃棄物の状況を正確に把握していない状態である．一部の施設では，運用中の機器の運転状態や保守管理情報に関しては，運転時間や保守時期およびその内容を記録する管理体制下に置かれているものはあるが，それらの情報はそれ以上に有効に利用されている例は少ない．今後は，例えば保守時期や部品交換必要の有無，運転条件の最適制御や部品情報から廃棄・リサイクル工程における分別作業への情報の応用など,多くの可能性が考えられる．

そこで，本研究では，前述のライフサイクルにわたる情報収集と受け渡しの手段として，汎用産業機器への IC タグシステムの導入を検討する．IC タグシステムは入隊室管理に始まり，最近では定期券等のアプリケーションで幅広く

普及しているが，人が持つアプリケーションとしては入力してあるデータを読み出す程度の性能が一般的である．その理由のひとつは市場にあるメモリはデータ容量が少ないことである．現在は，クレジットカードの IC 化のように IC タグのメモリ部において，厳格なセキュリティ（暗号化）機能を持たせた大容量のメモリの研究開発が盛んに行われている．これらは確実な情報の授受を保証するために通信距離は近接での読み出しが基礎となっている．物理量をデータとして定期的に追記させるなどのアクイジション機能を持ち，さらにある程度離れた距離からの読み取りおよび書き込みが可能な IC タグの開発は現在のところ見当たらない．本研究における IC タグは，機器に IC タグを取り付け，製品情報の記憶と共に運転状況の定期的な蓄積とそのデータの送受信を実現するところに独自性を有する．以上の機能を実現する IC タグシステム（これを特殊 IC タグシステムという）のハードウェアおよびソフトウェアを開発することの重要性が明確となる．

本研究では，以上に述べたように特殊 IC タグを媒体とした“製品の環境情報管理システム”を構築することを試みている．Fig.1.7 に，本システムのイメージを，汎用ポンプを例に整理した．まず，製造工場において，新規に製造されたポンプは，製品情報等を書き込んだ特殊 IC タグが取り付けられた上で出荷される．そして，使用・運用段階では，特殊 IC タグを活用し，運転時間や起動停止回数などの機器の運用情報を収集・蓄積することにより，ユーザー自身あるいはメーカー等による省エネ診断や故障診断，使用履歴の管理が可能となる．これを“運用情報管理システム”と呼ぶ．また，これらの運用情報は，製品が使用済みとなった時点での部品リユースやマテリアルリサイクル等の分別判断基準としても活用可能であると考える．本研究では，これらの情報と特殊 IC タグに記録された製品情報をもとに，再生工場において製品の分解手順や分別情報などの指示を行うことが可能な“3R 情報管理システム”も開発の対象としている．これにより，現在，手作業で行われている分解・分別工程の高効率化が実現されると考える．さらに，運用情報管理システムや 3R 情報管理システムによって，使用履歴によるリユースの可否に関する定量的な情報や分解しにくい設計箇所に関する情報など，環境に配慮した製品設計を検討する際に有用な知見が蓄積される．こうした情報に基づき，メーカーは効率的に 3R に配慮した製品設計を導入することが可能となる．また，分解性評価，環境負荷評価といった事前評価によって，その効果を定量的に知ることができる．以上のように，設計・製造段階における事前評価を含めたシステムを“製品の環境情報管理システム”と呼ぶこととする．

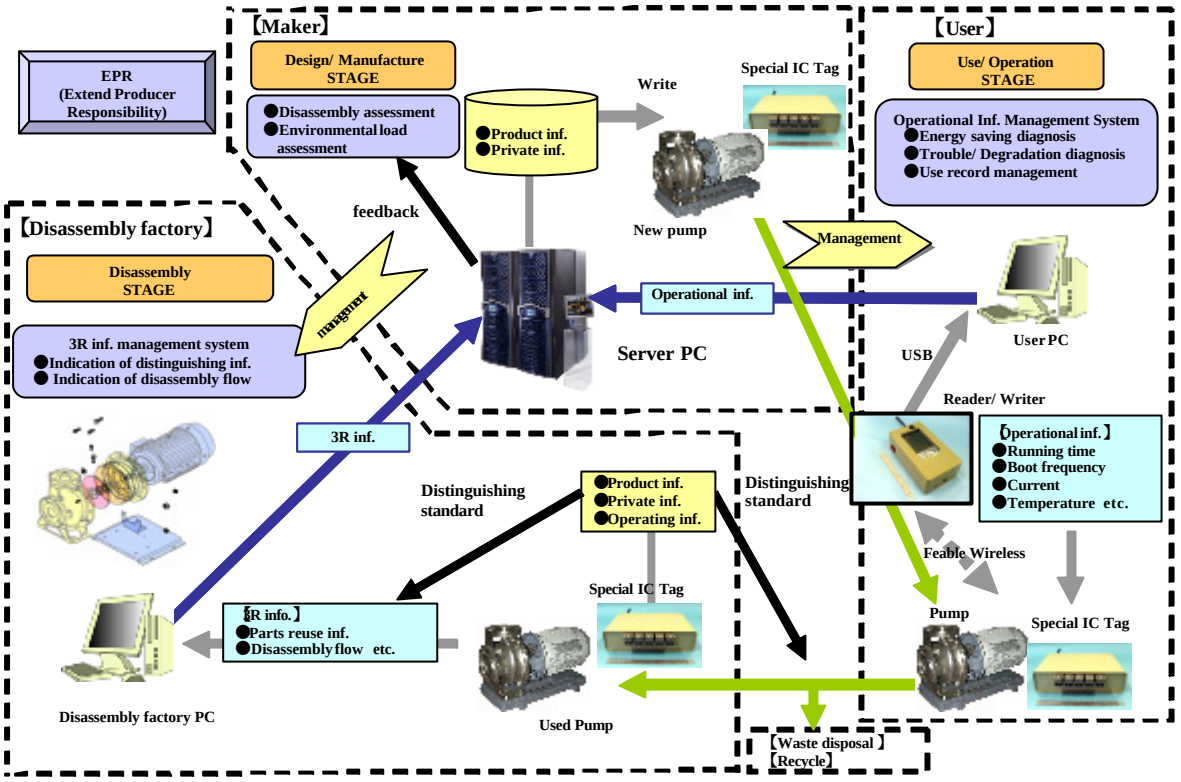


Fig.1.7 The outline of life cycle management system for general-purpose pump

1．2　本研究の目的

本研究では，設計段階で簡便に活用可能な標準性・利便性の高い環境配慮設計の評価手法および総合的なライフサイクル管理システムを構築し，ライフサイクル全般にわたる環境負荷削減に貢献する環境配慮設計・運用技術を開発することを目的とする．

まず，環境配慮設計の定量評価手法については，リユース，リサイクルの際に重要となる易解体性の定量評価手法と LCA 的な観点からの環境負荷評価を可能とする評価手法を開発する．

易解体性の評価手法に関しては，結合の探索や結合の解除および部品の取り出しに要する時間に基づき指数化を図り，製品の解体時間を予測することが可能な“分解性評価指数”を開発する．本手法の開発においては，設計段階において入手可能な情報のみで算出することが可能で，様々な製品へ横断的に適用可能な手法となることを前提においた．本指標を各種の工業製品に適用し，解体解析を行うことにより，製品の構造上の問題点の把握することが可能になる．また，これらの検討を通して，手法の高度化を図り，設計段階で活用可能な解体支援ソフトウェアの開発も行う．本ソフトウェアは，分解性評価指数や設計情報に基づく解体フローおよび 3D アニメーションなどの視覚的な情報によって解体作業を支援し，その効率化を図るシステムである．本システムによって，部品リユースの可否に関する定量的な情報や分解しにくい設計箇所に関する情報など，環境配慮設計を行う上で有用な知見を蓄積することが可能となる．

一方，易解体性評価だけでは，製品の総合的な環境負荷は把握できない．そ

こで，LCA 的な観点を導入した環境負荷評価手法が必要となる．本研究では，環境効率およびポテンシャル評価の概念を導入し，従来の LCA 手法の問題点，すなわち煩雑性や恣意性を排除した客観性の高い評価手法として,“ 環境効用ポテンシャル評価手法，Eco-Efficiency Potential Assessment Method (E2-PA) ” を開発する．ポテンシャル評価の考え方により，製品の設計段階で把握可能な情報のみで環境負荷評価が実践できることを可能とした．さらに，環境負荷とともに消費者の視点から効用を把握しなおすことによって，メーカー，消費者双方にとって有益となる指標を得ることができる．以上のような考え方を導入することで，標準性・利便性の高い指標を開発することが目的である．

以上の検討を基に，本研究の代表製品である汎用ポンプを例に，環境配慮設計を導入した環境配慮型汎用ポンプを開発する．解体解析によって改善すべき構造上の問題点を把握し，その長期使用を前提とした使形態を考慮した製品設計を行う．その際には，3R への配慮のみならず，使用・運用段階における発展的な構造変更を可能とする “ 成長 ” する製品の概念を導入する．そして，環境配慮型汎用ポンプの環境配慮性の評価を前述の分解性評価指数や E2-PA による評価を行い，その有効性を確認するとともに，環境配慮設計に関する情報開示のあり方を示す．

また，設計段階への環境配慮のみならず，運用段階の環境負荷低減を図ることを目的として,製品のライフサイクル全般を特殊 IC タグによって総合的に管理するシステムを構築する．他の工業製品にもいえることであるが，ライフサイクルにおける環境負荷の低減を実現するためには，環境配慮設計の導入，適切な運用・保守管理による省エネルギー化，解体・分別工程の高効率化等を実現する一貫したシステムの構築が必要とされている．こうしたライフサイクル管理システムを実現する特殊 IC タグシステムを開発する．

さらに，使用・運用段階において特殊 IC タグの記録情報を有効に活用することによって，省エネルギー診断や故障・劣化診断および余寿命予測が可能となる．これを本研究では,“ 運用情報管理システム ” と称し，本システムの有効性を検証するための実験的検討やソフトウェアの開発を，汎用ポンプを例に行う．また，他の製品への応用事例として自動販売機への適用を考慮し，その運用の高度化に資する検討を行う．具体的には，単に運用情報を取得するだけでなく，それらの情報を体系的に分析することによって，独自の省エネ診断システムの構築を試みる．

以下に，これまで述べた個別の研究項目の目的を記す．

1) 環境配慮設計の定量評価手法として，様々な工業製品に適用可能な易解体性の定量的な評価手法を開発する．
2) 環境効率の概念を導入し，製品の設計段階で容易に活用できるような標準性・利便性の高い環境負荷評価手法を開発する．
3) 今後，環境配慮設計の導入が必要とされている工業製品のうち，汎用ポンプを例として取り上げ，環境配慮設計を具現化する．解体性の向上や発展的な構造変更を可能とする “ 成長 ” する製品の概念を導入した環境配慮型汎用ポンプを設計・試作し，その環境配慮性を、上記 1）および 2）で開発した手

法により定量的に評価する.

4) IC タグシステムを核とした設計・製造，使用・運用，廃棄・リサイクルの製品のライフサイクル全般にわたる総合的な管理システムを開発する．とりわけ，汎用ポンプや自動販売機といった使用・運用段階における環境負荷が大きい工業製品を例として取り上げ，その運用管理の高度化による環境負荷削減の方策を検討する.

以上の検討により，工業製品のライフサイクルにおける環境負荷低減を支援するシステムを提案することが本研究の目的とするところである.

1．3　本論文の構成

本論文は，6 章から構成されている.

第 1 章では，本研究の背景，目的を明らかにするとともに環境配慮設計，LCA，家電製品・事務機器・汎用産業機器・営業機器などの各種工業製品における環境への取り組みの現状など，従来の研究および動向について述べる.

第 2 章では，環境配慮設計の重要な要素である易解体性の定量評価手法について述べている．製品の易解体性を定量的に評価する「分解性評価指数」を提案し，その定義および適用事例を示す．電子・事務機器，家電製品，縫製機器，福祉用具などを対象として，分解性評価指数による解体解析を行い，本指標の有効性を示すとともに各種製品に対する易解体設計の具体的例を提案した．これらの検討を通じて，さまざまな製品の解体データを体系的に整理し，製品の設計段階で入手可能な情報のみで分解性評価ができるよう、手法の高度化を図った．また，分解性評価指数と解体フロー，3D アニメーションを連携させた解体支援ソフトウェアを開発した.

第 3 章では，設計段階において比較的簡便に活用でき，LCA 的な観点を有する環境負荷評価手法として開発した「環境効用ポテンシャル評価手法（Eco-Efficiency Potential Assessment Method, E2-PA）」について述べる．E2-PA は，「環境効率」と「ポテンシャル評価」を考え方の基礎としており，従来の LCA 手法の煩雑性を排除した標準性・利便性の高い手法である．E2-PA における環境負荷の統合評価の考え方をその特長を整理するとともに，テレビやパーソナルコンピュータを例として評価を実施し，E2-PA の有用性を示した.

第 4 章では，2 章および 3 章で得られた知見を活用し，環境配慮設計を導入した環境配慮型汎用ポンプの設計･試作およびその評価を行った．具体的には，ステータ・ロータ等の資源として有用性の高い部品を含む電動機の解体性の向上に着目した．また，使用・運用段階で発展的な構造変更が可能な“成長”する製品の概念を導入した．試作ポンプの環境配慮について評価を行ったところ，分解性評価指数は約 20%向上し，ライフサイクルあたりの環境負荷も約 35%削減可能であることを E2-PA を適用することにより実施した.

第 5 章では，特殊 IC タグシステムによる工業製品のライフサイクル管理システムの開発およびその応用について述べている．まず，情報管理を行う媒体として，製品固有の識別情報だけでなく，機器の運用情報を定期的に収集・蓄積することが可能な特殊 IC タグシステムのハードウェア･ソフトウェアを開発

した．さらに，汎用ポンプを例に，シミュレーションや実験および特殊 IC タグシステムの実証試験を通じて，省エネ診断，故障・劣化診断，使用履歴の予測が，開発したシステムによって可能であることを示した．また，運用情報管理システムの応用例として，自動販売機を取り上げ，本システムの適用可能性についても検討した．自動販売機の運用情報を解析することで，その稼動状態の把握や省エネ診断が可能であることを実測データに基づき示すとともに，売上に応じて最適な自動販売機の設置台数，容量を算出する最適配置診断システムを構築した.早稲田大学大久保キャンパスに設置されている 29 台の自動販売機を例にとると，運用の最適化を行うことで約 40%の省エネルギーが達成できることを示した.

第 6 章では，本論文のまとめとして，本研究で得られた成果を要約するとともに，今後の研究展望について述べている.

第 2 章

易解体性定量評価手法の開発

第 2 章　易解体性定量評価手法の開発

2. 1　目的

資源循環型社会の構築に向け，工業製品においては，設計・生産段階における 3R（Reduce，Reuse，Recycle）への配慮の必要性が増してきている．こうした環境に配慮した製品設計は，自動車，家電製品，複写機，レンズ付フィルムなどを中心にその導入事例が紹介されており，また，製品の易解体性やリサイクル性を評価する手法についても，各メーカーにおいて開発され，その成果が報告されている．しかし，実際には，環境配慮設計の概念が浸透しているとはいえない製品も存在し，また，先駆的に取り組みが行われてきた製品においても，改善の余地が残されており，資源循環型社会の高度化に向け，それらを見直す必要性が生じている．評価手法に関しても，従来の手法は，取り扱うデータが細分化し，必ずしも入手可能とは限らないことや評価対象が該当企業の製品に限定されることなどから,汎用的な手法として確立しているとは言い難い．また，それに関連して，各種の工業製品，あるいは異なるメーカーの機種を同一指標で評価を試みた事例も見当たらない.

そこで，本章では，とくに Reuse，Recycle への対応として必須事項である易解体性に着目し，以上のような問題点を解決することを目指した評価手法として開発した分解性評価指数について述べる．本手法は，設計段階で比較的容易に入手できる情報のみで，様々な製品の評価が可能なツールとして，筆者らが開発したものである.

さらに，分解性評価指数の開発で得られた知見を応用し，使用済み製品の分解・再生工程の高効率化を解体フローやアニメーションによって支援する解体支援ソフトウェアの開発も行った．これは，製品の部品や結合点数などの設計情報を入力することによって容易に対象製品の解体フローを生成することができるソフトウェアである．その際，分解性評価指数との連携も考慮し，解体フローに基づき，簡便に易解体性評価が可能な仕様とした．さらに，既存の CAD データとの連携を念頭においた 3D アニメーションを上記の解体フローと同時に示すことにより，効率的に解体作業の支援に必要な情報を入手できるツールとなることを目的とした.

2. 2　分解性評価指数の定義

製品の解体時間を短縮するには，設計段階で試作・解体を繰り返して解体時間を実測し，設計の変更を検討することになり，製品設計の効率が悪くなる.

ここで紹介する分解性評価指数は，このような問題に対応するため，設計段階において実際の解体時間に相当した定量的な評価が可能である指標として開発しているものである [7].

分解性評価指数では，式 (2.1) に示すように，解体という作業が，結合探索，結合解除，部品取り出しの 3 つの異なる工程により行われていることを表現している.

$$T = T_d + T_s + T_p \tag{2.1}$$

ここで，T：総解体時間[s]
T_d：結合解除時間[s]
T_s：結合探索時間[s]
T_p：部品取り出し時間[s]

式（2.2）は，分解性評価指数 D の具体的な計算式を示したものである．

$$\begin{aligned} D &= D_d + D_s + D_p \\ &= \Sigma\ (m_i \times p_i) + m \times q + (n-1) \times r \end{aligned} \tag{2.2}$$

ここで，D：分解性評価指数
D_d：結合解除に相当する分解性評価指数
D_s：結合探索に相当する分解性評価指数
D_p：部品取り出しに相当する分解性評価指数
m_i：結合種類ごとの結合点数[個]　m：結合点数[個]　n：部品点数[個]
p_i：結合種類ごとの平均結合解除時間に相当する指数[/個]
（結合解除指数）
q：各製品の平均結合探索時間に相当する指数[/個]
（結合探索指数）
r：各製品の平均部品取り出し時間に相当する指数[/個]
（部品取り出し指数）

本研究では，「解体」は，製品を部品あるいは素材別に分離するまでの全体としての行為を意味し，「分解」は，結合を解除する，部品を取り出すといった個々のプロセスを意味する．分解性評価指数は，以下に述べるように「分解」という個々のプロセスの総和として指数化を図っていることから，このように称している．すなわち，結合探索は結合の総数に比例し，部品取り出しは部品総数から 1 を引いた値に比例すると仮定し，結合解除は各結合に対する指数の合計値から算出する．各指数 p_i，q，r の決定方法については後述する．

2．3　分解性評価指数による解体解析

本項では，分解性評価指数による解体解析の事例を示す．電子・事務機器，家電製品への適用事例を示し，さらに個別の製品を対象とした詳細な解析を家庭用ミシンおよび手動車いす例に述べる．こうした検討を通して，様々な製品に適用可能な分解性評価指数の開発に向けた指針を得る．

2．3．1　解体試験方法

作業者 1 名が，手工具による解体試験を行い，解体データを採取する．採取する解体データは，部品点数，結合点数，結合の種類，解体時間である．データの採取は，主要部品を 1 つ（工程によっては複数）取り外す工程を 1 工程の

目安とし，時間を計測する．そして，その工程において取り外した部品点数，解除した結合点数，結合の種類及び使用した工具を記録する．この作業を繰り返し，合計値をそれぞれについて算出して，対象製品の解体データとする．以下の検討では，これらのうち，解体時間の合計値を実解体時間と表現し，実測したデータであることを明確化している．また，実際の解体・リサイクル業者では，Recycle（原材料としての再利用）を目的としていることが多く，破砕を伴うような大雑把な解体作業が行われている．しかし，本研究では，LCA（Life Cycle Assessment）により環境負荷の観点からの有効性が示されている Reuse（部品としての再使用）[51]への将来的な対応を考慮し，基本的に破砕を伴う解除は行わないことを解体試験の前提とした．ただし，基板などの分離に際し，配線を切断せざるをえない場合には破断した．

本解体試験においては，前述した分解性評価指数の定義に準ずる解体データを得ることを意図して工具の選定も含め，諸条件を設定した．

本研究では，実解体時間を重要なデータとして位置づけている．これは，分解性評価指数が結合の解除や部品の取り出しに要する時間をもとに指数化されたものであり，その評価指標としての妥当性を実測データから検証することも目的としているからである．本研究では，筆者が解体試験を行ったが，解体時間は，作業者の熟練度に依存するだけでなく，Reuse か Recycle かなど解体作業の目的によっても大きく異なり，その信頼性に関しては議論のあるところであろう．しかし，実際の解体現場などにおける解体時間をメーカーや解体・リサイクル業者から入手することは極めて困難であるだけでなく，仮にそのようなデータが得られたとしてもそれを同一レベルで論じることは，本研究の目的とする「メーカーが異なる各種の製品の同時評価」という観点からすると適切ではないと考える．こうした理由から，本研究では，独自に計測した実解体時間をもとに各種の検討を行っている．

2．3．2　解析方法

2．2 で示した分解性評価指数による評価を行う．以下に，式（2.2）における各指数 p_i，q，r の決定方法を示す．

（1）結合解除指数 pi

本研究では，結合種類をネジ類，はめ込み類，接着類等に適宜分類し，実測した結合解除時間に応じて，結合解除指数 p_i を割り当てている．同じ結合種類でも，解除時間には多少の幅があるが，ここでは，各結合の平均結合解除時間に相当する値を結合解除指数と定義している．また，製品固有の特殊な結合など新たな結合が生じた場合には，解除時間を実測し，その値を新たに加えることとしている[52]．各種工業製品の解体試験を通じて，pi を体系的に整理することを目的とするが，主な結合種類の結合解除指数 p_i をネジ類，はめ込み類，接着類に分類して Table 2.1 に示す．

Table 2.1 The list of connection disassembly index p_i

Average disassembly time s/parts	Connection Disassembly Index p_i /parts	Connection method		
		Screw	Fitting	Bond
Under 2	1	Small screw	Fitting (by hand)	Cutting Connector Band
4	4	Screw (by hand)	-	-
10	10	Screw (+, -, Hexagonal) Bolt	-	Bond on a curved surface
30	30	Special screw	Fitting (by tool)	Adhesive Tape

（2）結合探索指数 q

結合探索時間は，熟練性等に最も影響される時間であるが，本研究では，製品ごとの構造の特徴によっても結合探索の易難は変化するという観点から検討を行っている. 例えば, デスクトップ型 PC 本体やレーザ式プリンタのように, ネジが集中的に配置されている製品では,結合探索時間は短くなるであろうし, 大型な家電製品では作業者の移動も伴うこともあり,結合探索時間は長くなる.

このような観点から，本研究では，実解体時間による補正を行った上で，q を決定する手法を採用している．以下，具体的な決定方法について述べる．まず, 補正にあたっては,「製品の解体データより算出した結合解除及び部品取り出しに相当する分解性評価指数は，実解体時間に対応した値となっている」という仮説を前提としている（平均部品取り出し時間に相当する指数 r は，後述するように一律に 10 としている）．また，上述したように，式(2.2)で算出される分解性評価指数は，実解体時間に相当する値となるように定義している．そこで，q をパラメータとして変化させ，分解性評価指数と実解体時間の比が最も 2 に近づくときの整数値を該当製品の q と決定することとしている．なお, q は製品種類ごとに 1 つの値を割り当てる.

すなわち，式(2.3)における分解性評価指数と実解体時間の比の全サンプルの平均値 τ_{av} を算出する．その後，式(2.4)より，判定値 ε を算出し，パラメータ j を変化させて，ε が最小となるときの j を該当製品の q と決定する.

$$\tau_{av} = \sum_{N}\left(\frac{T}{D_{q=j}}\right)\Big/ N \qquad (2.3)$$

$$\varepsilon = \left|1 - \tau_{av}\right| \qquad (2.4)$$

τ_{av}：評価対象製品における分解性評価指数と実解体時間の比の平均値

T：実解体時間[s]

$D_{q=j}$：q が j であると仮定したときの分解性評価指数
N：該当製品のサンプル数
ε：判定値
j：q に相当するパラメータ（j=1, 2, 3, …）

（3）部品取り出し指数 r

平均部品取り出し時間は，製品による差異が小さいという観点から，一律に 10 という値を採用している．これは，平均部品取り出し時間が約 10 秒であることを意味し，家電製品の解体試験を行った際の実測値である [5)]．

2．3．3　解体試験の対象製品

Table 2.2 および 2.3 に解体解析対象の製品の一覧を示す．Table 2.2 には，同一製品で複数のサンプルを対象に解体試験を実施した製品を整理している（ただし，介護用ベッドは 1 台のみ）．デスクトップ型 PC 本体，CRT 型の PC モニタ（17 インチ），インクジェット式プリンタ，レーザ式プリンタ，家庭用ミシン，手動車いす，介護用ベッド，テレビ，汎用ポンプ（出力：1.5kW），オフィスシーティングが対象製品である．テレビは，画面サイズの異なる製品を対象としているが，その他の製品に関しては，同程度の性能，サイズを有する製品を複数選定しており，大半が 1990 年代に製造されたものとなっている．また，Table 2.3 には，解体サンプル数は少ないが，比較対象として評価対象とした製品の一覧を示している．大型・小型の家電製品や AV 機器や圧縮機，送風機などの汎用産業機器も含まれている．

Table 2.2 The list of products for disassembly experiments

Procucts	Sample number	Year of manufacture	Mass kg	Notes
Desk-top PC	5	1996~1998	8.0~12.7	-
PC monitor	4	1995~1997	17~20	CRT type (17 inch)
Ink-jet printer	4	1985~1996	4.8~9.0	-
Laser printer	4	1991~1995	17~20	-
Sewing machine	7	1991~1997	6.8~10	-
Wheelchair	5	2001	8.7~19.5	-
Nursing care bed	1	1995	83	-
TV set	6	1977~1994	14~80	Screen size:13~37 inch
Pump	4	2001	18～50	Output: 1.5kW
Office seating	3	1988~2001	12~17	-

Table 2.3 The list of products for disassembly experiments (part 2)

Procucts	Sample number	Year of manufacture	Mass kg
Air conditioner	1	1972	10
Refrigerator	1	1986	60
2 baskets type washing machine	1	1978	25
Automatic washing machine	1	1983	35
Video deck	2	Unknown	3.5, 7.0
Radio cassette player with CD	1	Unknown	18
Tea pot	1	Unknown	2.4
Toaster	1	Unknown	2.4
Microwave oven	1	Unknown	
Electric fan	1	Unknown	
Rice cooker	1	Unknown	

2．3．4　解体解析結果

（1）分解性評価指数と実解体時間の関係

分解性評価指数を算出する前段階として，結合探索指数 q を決定する必要がある．ここでは，車いすを代表例として q を決定する手順を示す．Table 2.4 には，式(2.3)，(2.4)に示した q を決定する際の判定基準となる τ_{av} 及び ε を整理した．この結果より，j が 2 のとき， ε が 6.43E-05 と最小となっているため，車いすの q は 2 と決定される．他の製品についても同様の手段で q を決定した．この方法で決定した各種工業製品の q の値の一覧を Table 2.5 に示した．q の値が小さい製品ほど結合探索が容易であることを意味するが，図からもわかるように，q の大小は製品の大小や分解性評価指数の大小との関連性はなく，各々の製品の構造に依存すると考えられる．例えば，q が小さいレーザ式プリンタ，PC 本体はネジがまとまって配置されており，解体方向が統一されている．一方，q が大きいテレビ，PC モニタは結合部の視認性が悪く，解体時に製品の方向転換が必要な構造となっている．車いすでは，q がここに挙げたどの製品よりも小さい値となっていることがわかる．この要因として，車いすは製品が比較的大型（容積という観点から）であるにもかかわらず，家電製品や電子・事務機器とは異なり，外装部品がなく，結合箇所が剥き出しでその視認性がよいこと，また，大型のユニットであっても軽量なものが多く，製品本体から分離しての個別の解体が可能であり，解体作業時に製品や作業者の移動を伴う必要性が少なかったことによることなどが挙げられる．また，同じ福祉用具である介護用ベッドに関しても同様の特長が見られ，q が 3 と小さい値となっている [2)]．

Fig.2.2 には，各種工業製品の分解性評価指数と実解体時間の関係を示した．製品一律に q を決定しているため，テレビのような製品では若干のばらつきはあるものの，両者は，同図に示す傾き 1 の直線で大略整理されることが確認できる．

Table 2.4 The data for a determination of the connection searching index "q" for Wheelchair

Parameter which corresponds to "q" j	The average ratio of Disassembly time to Disassembly Property Index t_{av}	Judgement value e
1	1.030	0.030
2	1.000	6.43E-05
3	0.971	0.028
4	0.944	0.055
5	0.918	0.081
6	0.893	0.106
7	0.870	0.129
8	0.848	0.151
9	0.827	0.172
10	0.808	0.191

Table 2.5 Connection searching index q of products

Procucts	Connection searching index q
Desk-top PC	5
PC monitor	10
Ink-jet printer	8
Laser printer	4
Sewing machine	8
Wheelchair	2
Nursing care bed	3
TV set	14
Pump	6
Office seating	6
Air conditioner	10
Refrigerator	10
2 baskets type washing machine	10
Automatic washing machine	10
Video deck	7
Radio cassette player with CD	9
Tea pot	4
Toaster	4
Microwave oven	7
Electric fan	4
Rice cooker	3

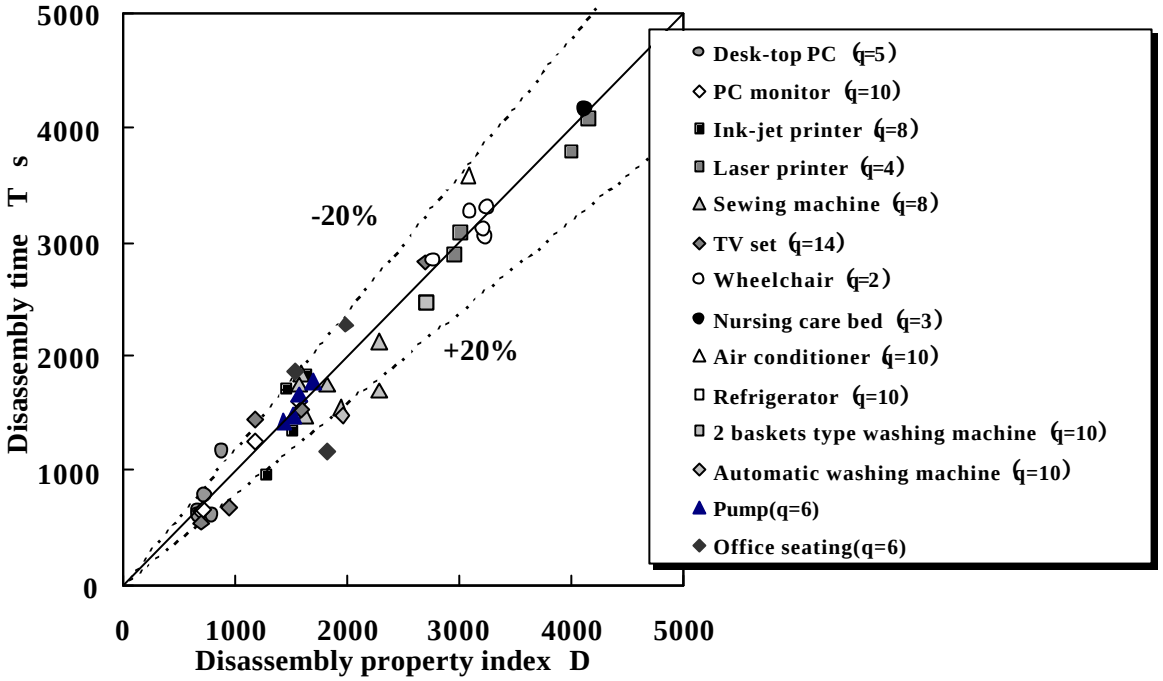


Fig.2.2 Relation between Disassembly property index and disassembly time

（2）各工程の分解性評価指数

Fig.2.3 に各工程の分解性評価指数を製品ごとに示す．この図において高い値を示している分解性評価指数の低減を図ることが解体性の向上に有効であるといえる．PC 本体はいずれの分解性評価指数も低く，他の製品と比較すると解体性が良好であるといえる．PC モニタは，結合探索における分解性評価指数 D_s が高くなっており，テレビと似た傾向を示している．2 種類のプリンタ，家庭用ミシン，車いす，介護用ベッドにおいては，いずれも結合解除における分解性評価指数 D_d が高くなっている．また，同一製品内では，各分解性評価指数の大小は，同一の傾向を示していることがわかる．

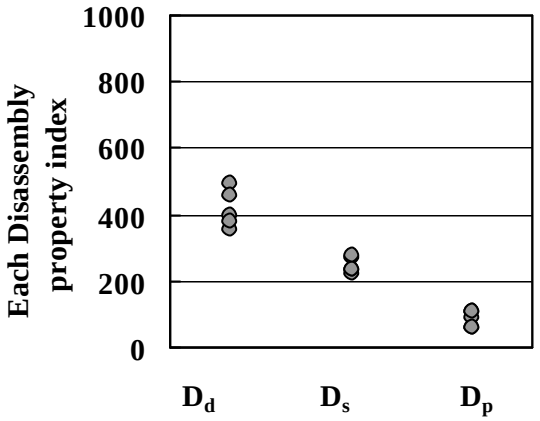
Fig.2.4 では，製品ごとの各分解性評価指数の平均値を比較したものである．本項で対象とした製品間では，車いす，介護用ベッド，レーザ式プリンタの結合解除における評価指数 D_d が明らかに大きくなっていることがわかる．

（3）製品ごとの構造の問題点

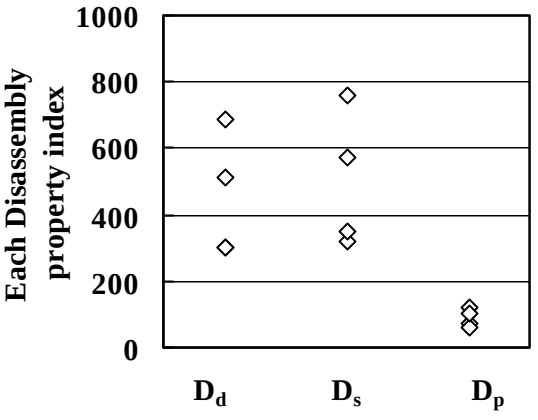
以上の結果をもとに，製品ごとの構造の問題点を整理する．PC モニタ，テレビでは，CRT 結合部の視認性が悪くなっている．インクジェット式プリンタではサンプルによってローラ部が圧入されているものがあり,解除困難であった．レーザ式プリンタ，家庭用ミシンではネジの本数が非常に多くなっている．また，車いすでは，一結合あたりの結合解除が非常に困難となっており，介護用ベッドでは，製品が大型であるために結合点数が大きくなっている．

また，汎用ポンプに関しては，第 4 章で詳細を述べるが電動機部分の解体性の向上が求められる．オフィスシーティングでは，車いすと同様，一結合あたりの結合解除時間が大きくなっている傾向があるのでその簡易化が求められる．

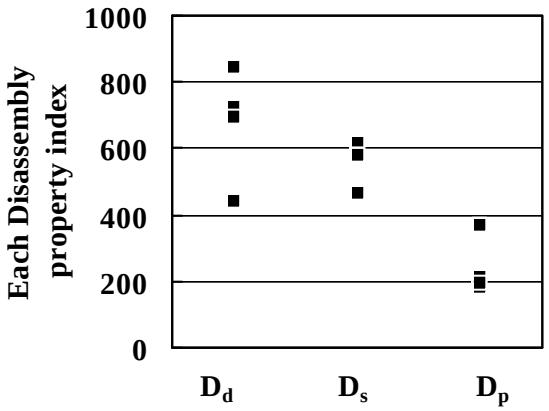
D_d: Connection disassembling
D_s: Connection searching
D_p: Parts separating



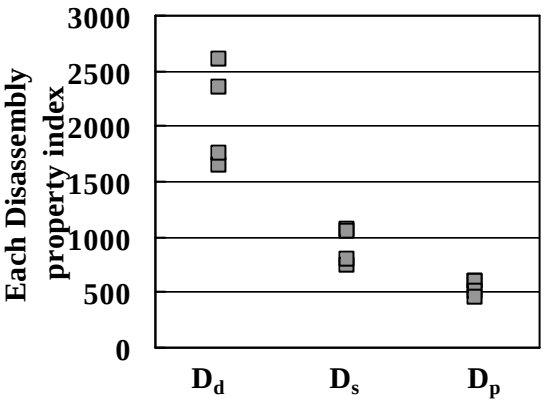
(a) Desk-top PC (q=5)



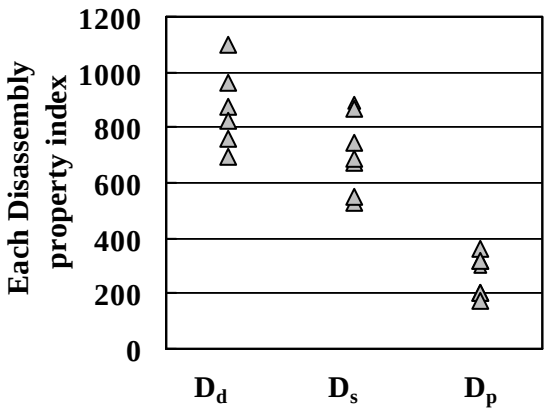
(b) PC monitor (q=10)



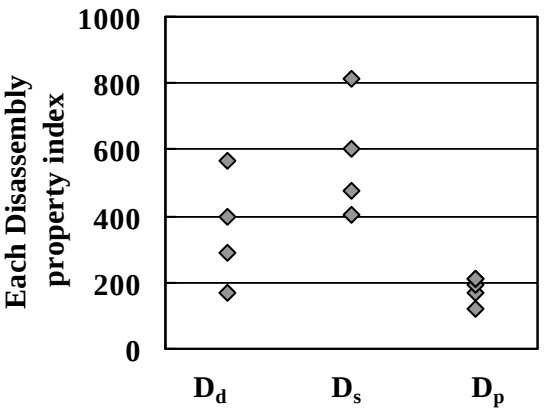
(c) Ink-jet printer (q=8)



(d) Laser printer (q=4)



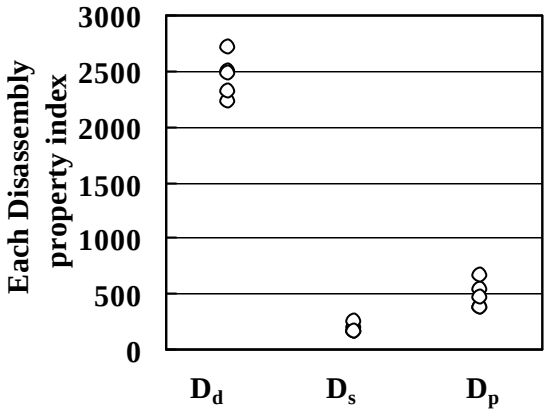
(e) Sewing machine (q=8)



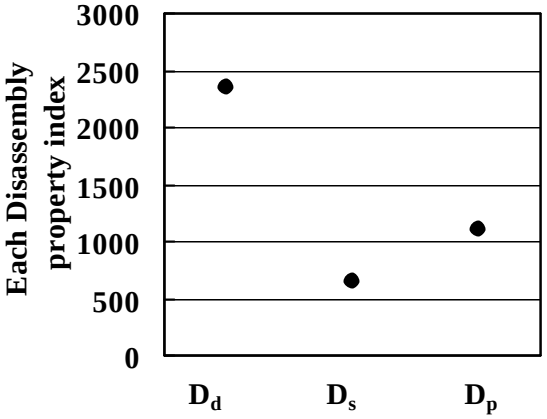
(f) TV set (q=14)

Fig.2.3 Comparison of each Disassembly property index (Part 1)

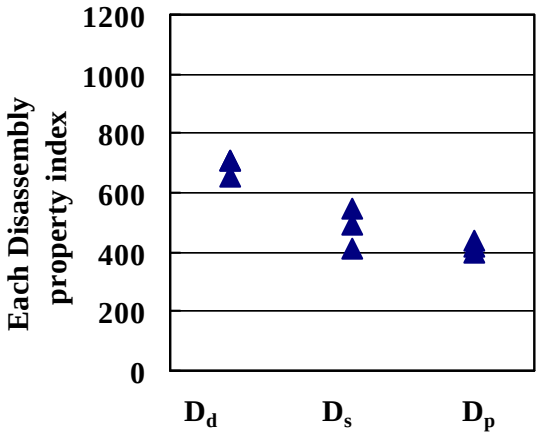
D_d: Connection disassembling
D_s: Connection searching
D_p: Parts separating



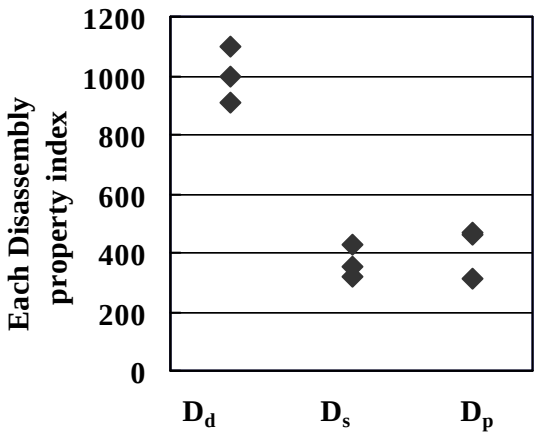
(g) Wheelchair (q=2)



(h) Nursing care bed (q=3)



(i) Pump (q=6)



(j) Office seating (q=6)

Fig.2.3 Comparison of each Disassembly property index (Part 2)

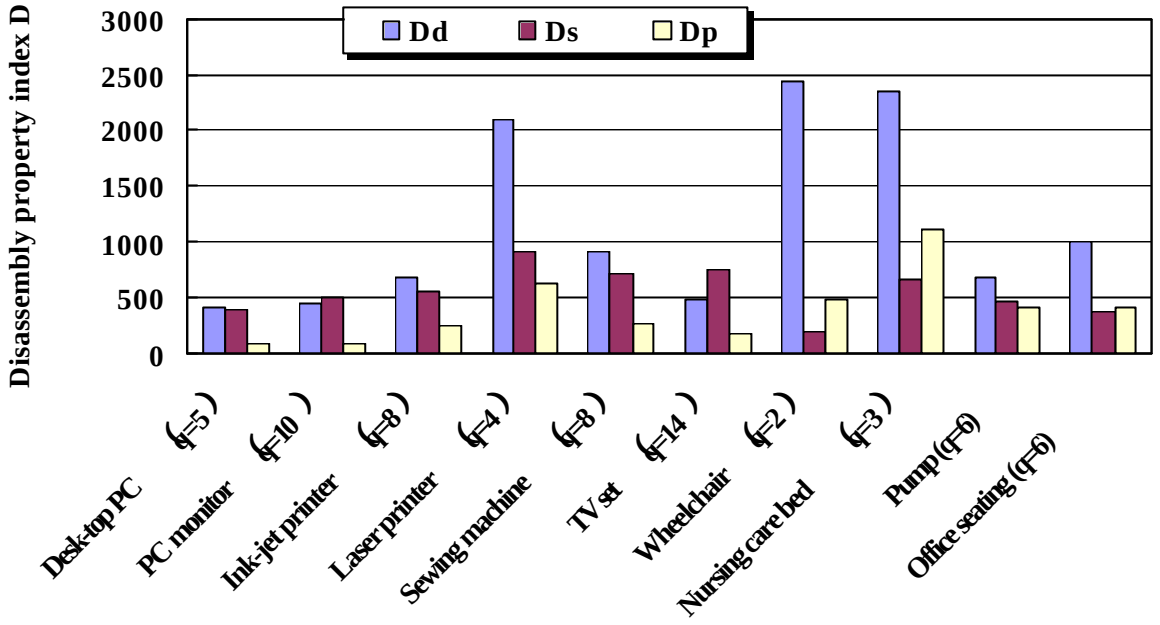


Fig.2.4 Comparison of each Disassembly property index (Average of respective products)

（4）易解体性を考慮した設計手法の提案

以上の解析結果と解体作業での経験をもとに易解体性を考慮した設計手法の提案を行う．その主な内容を Fig.2.5 に示す．まず，外装部品を結合するネジの視認性を向上させるために，ネジの位置の明示と結合方向の統一化が有効である．また，主要部品を外側に個別に配置して分離の容易化を図ること，基板では少数のネジとはめ込みを併用した結合方法を採用することが有効と考える．全体としては，ネジの本数の削減，ネジの種類の統一化などの改善ポイントが挙げられる．

ここで示した内容は，従来の報告[1),2),5)]で提案されている内容と重なる部分もあり，ある分野の設計者には浸透していると考えられる．しかし，現状では，解体作業はメーカーの管理が細部まで及ばない解体・リサイクル業者により行われていることの方が多く，設計と解体・リサイクル現場が一体となっているケースは稀である．そのような観点からすると，解体作業者の視点からの製品の構造上の問題点が設計段階へのフィードバックが有効には行われているとは言い難い．本研究では，そのような「易解体性」という観点から設計評価を行ったが，その結果，Fig.2.5 に示す提案内容に関しては，未だ改善の余地があることが確認された．

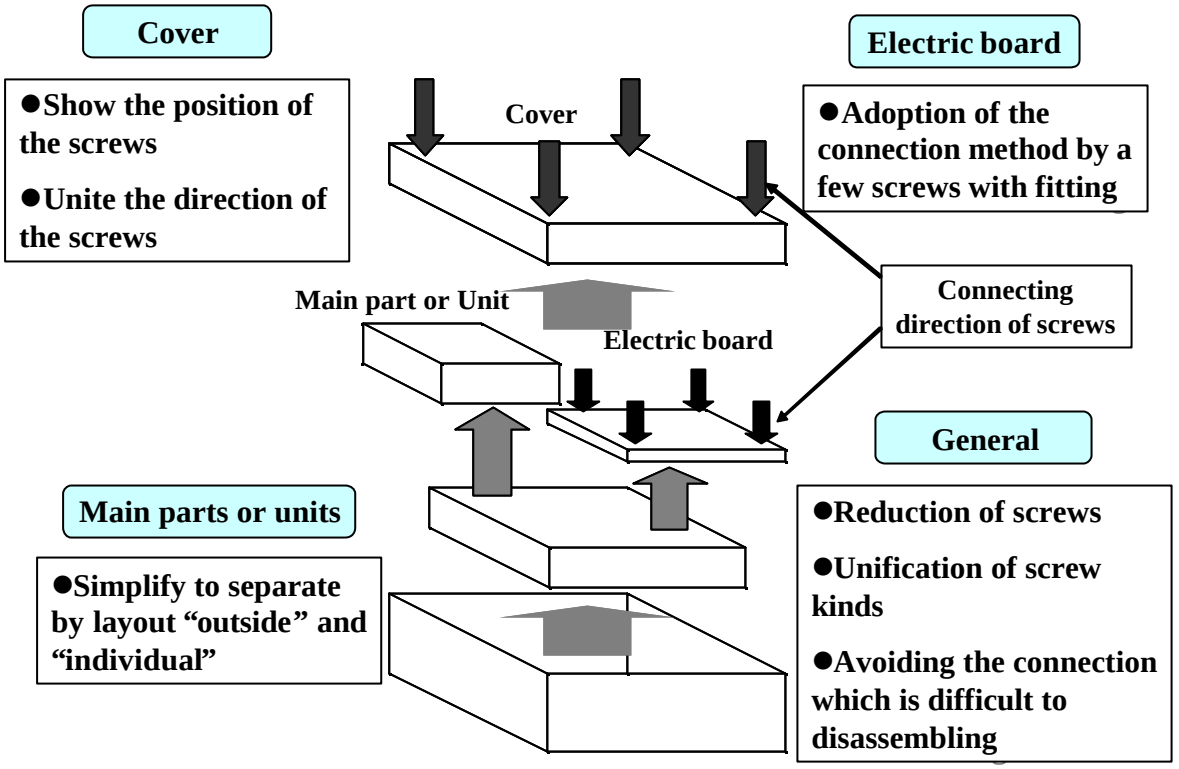


Fig.2.5 Proposal of Disassembly-Oriented Design (DOD) of the industrial products

2．3．5　家庭用ミシンの解体解析

家庭用ミシンは，電子・事務機器や家電製品とは異なり，結合が解除できない，部品が取り外せないといった根本的な構造上の問題点を有していた．そこで，本項では，家庭用ミシンに特化した易解体設計を提案することを目的に，家庭用ミシンの解体試験を独自に実施し，そこから得られた解体データの解析を行い，その構造の特徴を整理した．数値的な解析結果には現れない解体作業の経験から得られた設計の改善ポイントを「易解体性」という観点から具体的に示すこととする．

（1）解体試験結果

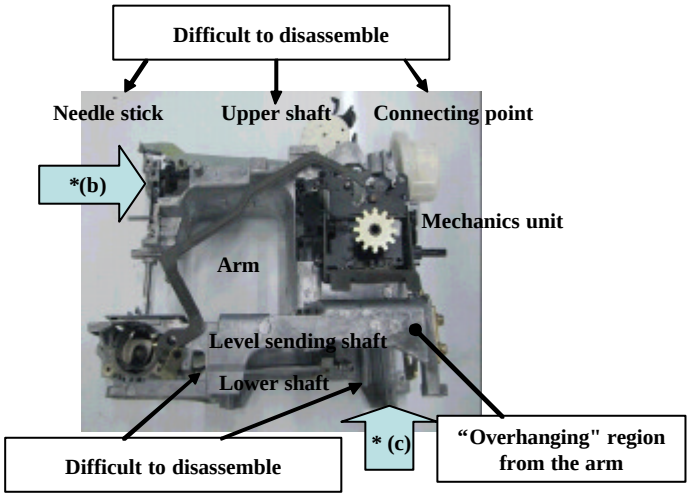
評価対象とした家庭用ミシンの仕様を Table 2.6 に示す．A 社及び B 社の製品，計 7 台を評価対象とした．同表に示すコンピュータ式(Computer type)ミシンとは，針の上下運動，縫い目の長さなどをマイクロコンピュータで制御するもので，電子速度制御付き(Electronic speed control type)ミシンとは，針の上下運動を電子回路で制御するミシンである．いずれも 1990 年代に製造された製品であり，とりわけサンプル No.1，2 のコンピュータ式ミシンは，A 社が独自に実施している社内の製品アセスメントの規定に基づき設計された製品である．

冒頭でも述べたように家庭用ミシンにおいては，構造上の問題から解除できない結合や結合を解除しても取り外せない部品があり，しかもそれがサンプルによって異なっていた．したがって，同表に示す「結合点数」とは，「解除した結合点数」を意味し，「部品点数」とは「取り外した部品点数」を意味することを留意されたい．なお，本研究では，基本的に各メーカーの修理マニュアルに

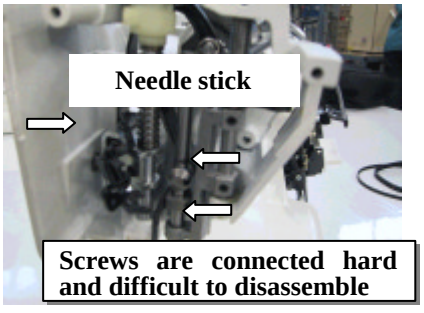
基づき部品点数をカウントしているが，ユニット（修理マニュアルでは「組部品」と表現されているが，本研究では「ユニット」という）を最小単位としている．例えば，モータ，電子基板，軸などは更なる解体が可能であるが，それぞれ一部品とみなしている．

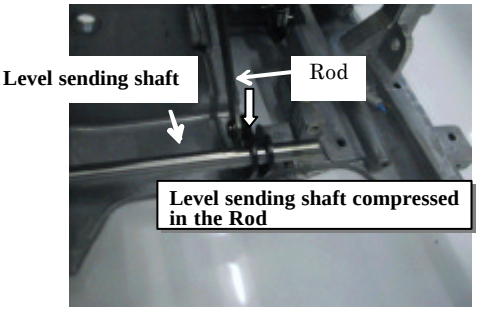
Table 2.6 Disassembling results (Sewing machine)

Sample No.		1	2	3	4	5	6	7
Maker		A company				B company		
Year of manufacture		1997	1997	1994	1994	1991	1991	1993
Classification		Computer type		Electronic speed control type				
Mass	kg	10	10	6.8	6.8	9.0	9.0	8.3
Total connection number	parts	93	84	66	69	111	108	86
Screw	parts	72	66	54	58	89	95	71
Fitting	parts	6	9	9	10	11	10	9
Bond	parts	15	9	3	1	11	3	6
Parts number	parts	33	37	21	21	31	33	18
Disassembling time	s	1551	1850	1483	1754	2127	1707	1759



(a) Remaining of a sewing machine (Electric speed control type)





(b) Around the rod　　**(c) Around the needle**

Fig.2.6 Problems of sewing machines's structure

（2）解体試験から得られた家庭用ミシンの構造上の特徴

（a）構造上の問題点

本項では，結合が解除できない，部品が取り外せないといった家庭用ミシンの根本的な構造上の問題点を「易解体性」という視点から具体的に述べる．とくに，電子速度制御付きミシンでみられた構造上の問題点をまとめたものを Fig.2.6 に示す．ミシンの解体は，外装部品を外した後は，アーム，すなわち，ミシン本体から各部品の分離を繰り返すことで作業が進行する．したがって，本研究でいう「部品が取り外せない」とは，「アームから部品が分離できない」ことを意味する．本研究では，解体試験終了後の状態を「残存部」というが，同図(a)は，電子速度制御付きミシンの正面カバー側からみた残存部である．以下，家庭用ミシンの構造上の問題点を整理する．

1）連結箇所

ミシンでは，駆動部品である機構台と軸系部品との連結箇所が存在するが，その連結箇所は，同図(b)のように，軸がロッドという部品に圧入されているなど，手工具による解除は困難である．しかも，その連結箇所は，アームの正面カバー側への張り出しによって隠れており，主要部品である機構台は，その周辺のネジを全て解除しても連結箇所の破砕なしでは取り外すことができない．

2）ネジ類

針棒，上軸，水平送り軸，下軸などをアームに結合しているネジ類は，締付けトルクが極端に大きく固着していることや，コーティングされていることなどにより解除が困難であった．同図(c)に，その一例として針棒周辺のネジ類を示す．また，一部のサンプルでは，専用ドライバを必要とする特殊ネジが使用されていた．これらは，ユーザーにより製品が解体されることを避けるための措置であると考えられるが，易解体性という観点からすると，改善することが望ましい．

3）止め輪

家庭用ミシンに採用されている止め輪は，サイズが小さいことに加え，分離できない他の部品が作業の邪魔になるなどの理由により，工具の可動域が極端に狭く，ほとんど解除できなかった．以上に挙げた点は，メーカーを問わず，電子速度制御付きミシンに共通の構造であり，これらを改善し，全ての部品の取り外しを可能とすることが解体性の向上を図るにあたり，重要であると考える．

（b）構造上の特長

しかし，その一方で，ミシンは主要部品が外側にかつ個別に配置されているという特長を有していた．とくにモータは少ないネジで結合されていたので，タイミングベルトとともに容易に取り外すことができた．これは，モータやタイミングベルトは，従来の修理サービスにおける交換需要が高く，交換しやすいように配慮されていることによると考えられる．このような部品の配置は，解体順序を問わず，少ない工程で取り外しや交換を目的とする部品に容易に到達できることを意味し，将来，3R，とりわけ Reuse への対応の面で有利となる

可能性を有している．したがって，モータ及びタイミングベルトを除いた部品について，先に述べたような締付けトルクやネジのコーティングなどの問題点を改善し，分離可能とすればその特長が生かされると考える．また，Fig.3.7 は，コンピュータ式ミシンの残存部であるが，Fig.2.6(a)と比較すれば明らかなように，アームの正面カバー側への張り出しがなく，結合点数の多い正面カバー側からの作業が容易で，メイン基板（機能からすると，電子速度制御付きミシンの機構台に相当）や上軸の取り外しが可能であった．このような配慮を，ミシンの種別によらず導入すれば，「部品が取り外せない」という問題点は改善されると考える．

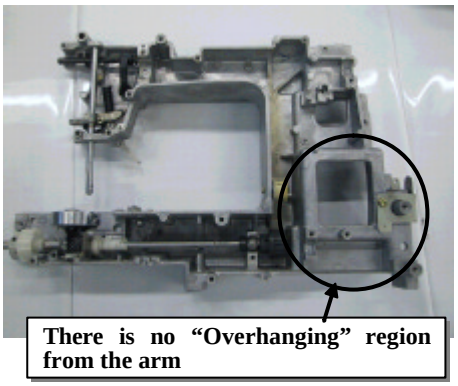


Fig.2.7 An advantage of the computer type sewing machines’ structure

（3）解体の最終到達点の比較

「解体の最終到達点」とは，本解体試験によって手工具により解除可能な結合を全て外し，到達した段階を意味する．ここでは，解除可能であった結合点数や取り外した部品点数のサンプル間の違いを定量的に示す検討を，とくに結合の大半を占めるネジと部品点数に着目して行った．具体的には，各サンプルの修理マニュアルより製品に含まれるネジの総本数と，総部品点数をカウントし，本解体試験で得られた解体データとの比較を試みた．なお，部品点数については，（1）で定義したようにユニットを最小単位とし，ネジについては，ユニット内部に含まれるものを含め，全ての本数をカウントした．

Fig.2.8 は，サンプルごとの取り外した部品点数と解除したネジの本数の各々の総数に占める割合を示している．コンピュータ式ミシンである No.1，No.2 では，80%以上の部品が取り外せているが，解除したネジの本数の割合はそれに対応していないことがわかる．しかし，これは，解除困難なネジが多かったのではなく，Fig.2.9 に示すようにコンピュータ式ミシンでは，分離した上軸，水平送り軸などのユニットに多くのネジが含まれていたことによる．以上の結果は，コンピュータ式ミシンにおいては，少ないネジの解除で部品の分離が多くできたことを意味し，ユニット化の考慮がなされているといえる．一方，電子速度制御付きミシンに着目すると，Fig.2.8 より，とりわけサンプル No.5，6 で顕著であるが，解除したネジの本数の割合が相対的に高いにもかかわらず，取り外した部品点数の割合がそれに対応していない．このことは，「ネジを解除しても部品を取り外せない」という構造上の問題点を現しているといえる．こ

れは，Fig.2.6 に示したような構造上の問題点によるところが大きい．

　このようにコンピュータ式ミシンが電子速度制御付きミシンと比較して解体性に優れていたのは，両者の構造的な違いだけでなく，今回評価対象としたコンピュータ式ミシンが，製品アセスメントに基づき設計されており，解体性への配慮がなされていることも理由のひとつとして考えられる．しかし，コンピュータ式ミシンにおいても約 20%の部品は分離できなかったので，さらなる解体性の向上の余地はあるといえる．

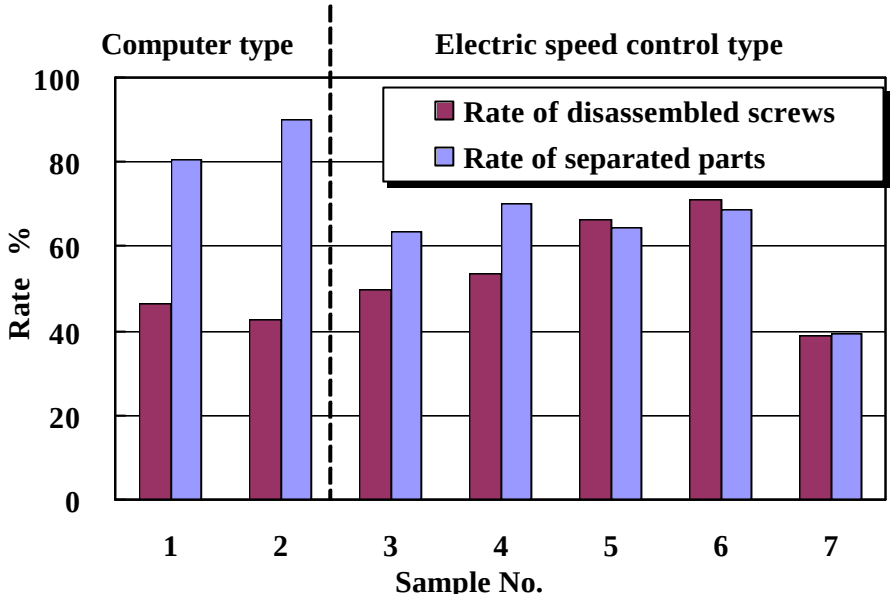


Fig.2.8 The rate of disassembled screws and separated parts

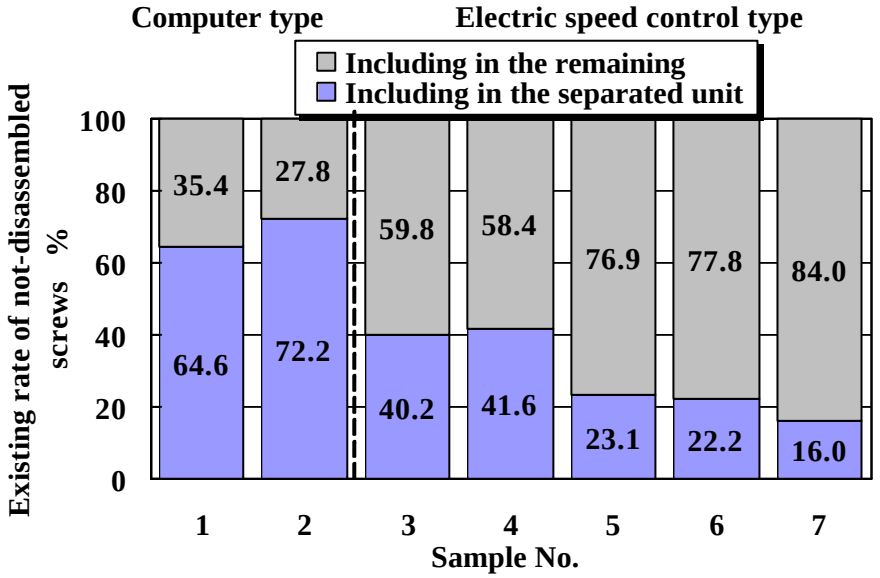


Fig.2.9 The existing rate of the “not-disassembled” screws

(4) 残存部の素材構成からのリサイクル性の検討

全ての結合を解除可能とする，あるいは全ての部品の取り外しを可能とするということは，易解体設計では重要である．しかし，別の観点からすると，分離容易な部品のみを取り外した後，残存部の素材が統一されていればそれ以上の解体の必要性はなく,そのままRecycleを行うことも考え方のひとつとなる．また, Reuse を行うにしろ, 幾度も繰り返し使用するわけではないので, Recycle に対応した設計を導入しておくことが望ましい．そこで，本解体試験における「解体の最終到達点」で十分なリサイクル性が確保されているかを検討することを目的に，各サンプルの残存部の素材構成を調査した．メーカーより，製品の部品ごとの素材構成データを入手し，各サンプルの残存部に含まれる部品から各々の素材質量を算出した．その結果を Table 2.7 に質量比で示す．からもわかるように，残存部の大半が Fe（鉄），Al（アルミニウム）などの金属類で構成されている．Al が大きな割合を占めているのは，最重量部品であるアームの主成分が Al であることによるもので，上軸，下軸，釜など残存部に含まれる部品の主成分は Fe であった．また，微量であるが残存部には POM（ポリアセタノール樹脂）などの樹脂類が含まれている. さらに, 年式の古い B 社製の No.5, 6，7 では，残存部に含まれる素材が多様であることが判明した．このように，残存部の素材構成はおおよそ金属類となっているが, Recycle の観点からすると, 樹脂類などは可能な限り分離するのが望ましい．とくに，資源としての有用性の高いアームを単一素材として処理できるように，樹脂類を含む軸系の部品，釜などはユニットとして分離可能であるような設計手法を導入することが重要であると考える.

Table 2.7 Material composition of the sewing machine

Sample No.			1	2	Average	3	4	5	6	7	Average
Classification			Computer type			Electric speed control type					
Mass percentage %	Metal	Fe	12.1	11.4	11.8	45.3	46.5	27.0	37.7	41.7	39.6
		Al	86.5	87.2	86.9	44.7	45.8	65.9	51.7	47.1	51.0
		Zn	0	0	0	0.755	0.744	0.984	0.773	0.887	0.829
	Metal total		98.6	98.6	98.6	90.8	93.0	93.9	90.2	89.7	91.5
	Resin*1	ABS	0	0	0	0	0	1.33	2.65	2.29	1.25
		POM	1.39	1.36	1.38	4.65	4.77	0.61	3.51	3.85	3.48
		PC	0	0	0	0	0	0.053	0.042	0.048	0.029
		6-PA	0	0	0	0.354	0.363	0.169	0.132	0.149	0.233
		Complex resin	0	0	0	0	0	0.275	0.216	0.248	0.148
	Resin total		1.39	1.36	1.38	5.00	5.13	2.44	6.55	6.59	5.14
	Others		0	0	0	0	0	0.466	0.667	0.748	0.376
Remaining mass g			2263	2235	2249	3840	3745	3653	4653	4052	3989
Total mass*2 kg			10	10	10	6.8	6.8	9.0	9.0	8.3	8.0
Mass percentage of the remaining %			23	22	22	56	55	41	52	49	50

＊1　ABS：Acrylonitrile Butadiene Styrene, POM：Polyoxymethylene, PC：Polycarbonate, 6-PA：6-nylon
＊2　Product mass.

(5) 家庭用ミシンの易解体設計の提案

以下，本研究を通して得られた知見をもとに，家庭用ミシンの易解体性を考

慮した設計手法の提案を行う．その主な内容を，本研究ではとくに触れなかった点も含め，Fig.2.10 に示し，以下，要点を述べる．

1）外装部品を結合しているネジ位置の明示

外装部品を結合するネジは，少ない点数で結合されているものの，ネジが隠れており，視認性が非常に悪い．したがって，外観に影響を与えない程度に外装部品に目印を付けることが有効である．

2）ネジ類への配慮

・正面カバー側の各部品を結合しているネジの本数を削減する．

・ネジを十字穴ネジに統一する．

・ネジの上からのコーティングを回避する．

・ネジの色や大きさを変え，結合している部品を明確化する．

ネジは，正面カバー側に集中しており，結合探索は容易であるものの，どの部品を結合しているかがわからないものが多数あった．したがって，上記のような配慮が望まれる．

3）部品の取り出し方向を正面カバー側に統一化

解体作業を行う上で，解体方向を統一し，製品を動かすことなく解体できることが極めて効率的である．これを実現するために，コンピュータ式ミシンで見られたアームの正面カバー側の張り出しをなくした構造を全機種に採用し，全ての部品を正面カバー側から取り外せるようにすることを提案する．

4）軸系の部品や連結箇所の結合方法の簡易化

モータについては，現行品でも分離の容易化が考慮されているので，針棒や軸系部品などその他の部品においても外側に配置されている点を生かし，同様の工夫がなされ，全ての部品をアームから分離可能とすることが望ましい．

5）ユニット化

家庭用ミシンは，複雑な機構を有しているので，細かな解体作業を要求されることもある．そのような細かい作業は，アームから部品を分離してから行うことが効率的なのでまず，「大きなまとまり（ユニット）」としてアームからの分離を可能とし，必要に応じて，その後に細かい作業を行えるように配慮すべきであろう．こうした配慮は，Recycle の観点から資源としての有用性の高い，アームの単一素材化にも寄与する．

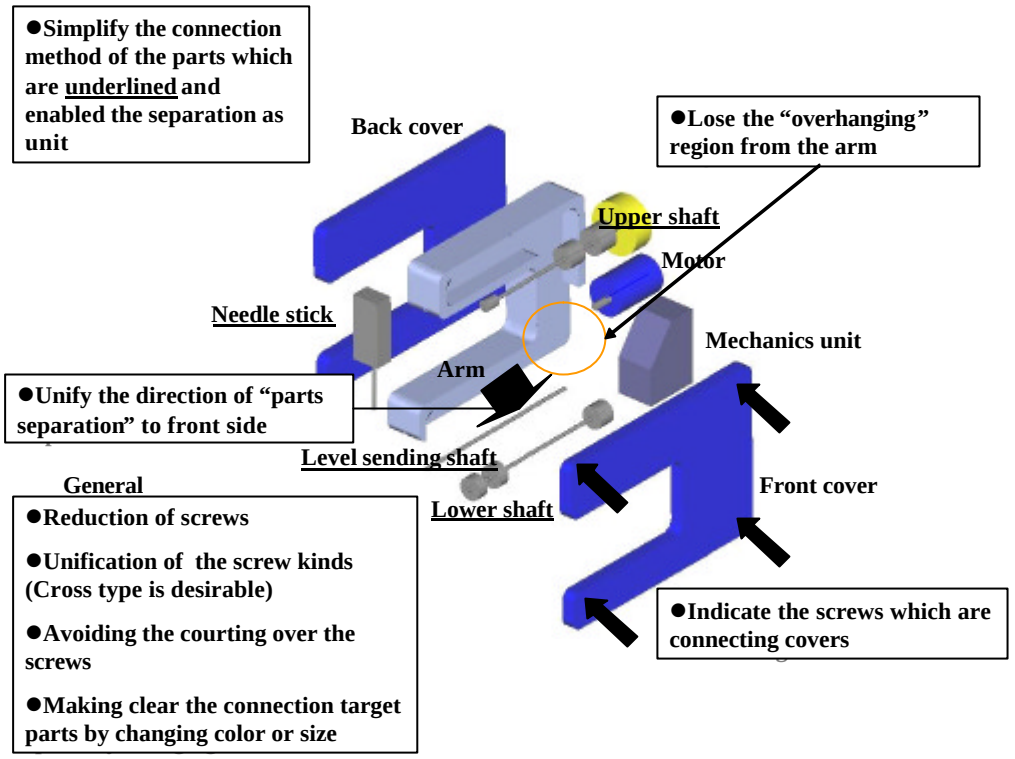


Fig.2.10 Disassembly-Oriented Design (DOD) for sewing machines

2．3．6　車いすの解体解析

福祉用具においても，設計・生産段階から廃棄・リサイクル段階までのライフサイクル全般に関わるガイドラインが策定されるなど，業界として環境への対応が本格化しつつある．しかし，その一方で，福祉用具の製造・流通に関わる大半の事業者においては，3R への対応の必要性を概念的には認めているものの，その具体的な取り組み方についての認識は統一されていないことも明らかになっている[53]．上記のガイドラインでは，需要量の多さから介護用ベッド及び車いすを対象品目と定めている．これらのうち，介護用ベッドについては，製品が大型であるため，結合点数や部品点数は多くなっているものの，レンタル事業等における部品交換を念頭においた設計手法が導入されており，筆者らの調査でも解体性に優れていることが確認されている[54]．一方，車いすにおいては，シートの取り外しを容易にするなど部分的な配慮がなされている事例はあるが，解体性に配慮した設計の導入に関しては，明確に検討されていない．

さらに，モジュール型車いすのように，部品交換の容易性に配慮した製品が市場に出始めているが，コストの割高感から普及が進んでいないのが現状である．

そこで，本項では，車いすの中でも市場規模の大きい手動車いすを評価対象として取り上げ，易解体性という観点から設計の改善ポイントを提案することを目的としている．具体的には，解体試験を実施し，分解性評価指数による定量的な評価を試みた．とりわけ，使用過程における部品交換や機能の調整などの容易性を考慮しているモジュール型車いすに着目し，その設計手法の有効性を「易解体性」という観点から定量的に示すとともに，さらなる改善に向けた

要点を整理する．

（1）評価対象製品の種別及び解体試験結果

本研究において対象としたのは，Table 2.7 に示した 5 台と同様であるが，Table2.15 に改めて示す．以下，同表に示す車いすの種別について説明する．

サンプル No.1 及び No.2 は，パイプの各部位が溶接により結合されている「溶接型」で，最も一般的に普及しているタイプである．我が国で生産される手動車いすの 95%以上がこれに該当する．溶接型では，各部位が固定されているため，以下に述べる「モジュール型」とは異なり，使用過程における部品交換や調整はできない．

車いすをはじめとする福祉用具を選定するにあたり，ユーザーへの「適合性」が重要となる．適合性とは，ユーザーの身体のサイズや障害状態に合った福祉用具を提供（使用）することを重視した考え方である．つまり，ユーザーの状態の変化によって，要求される機能も異なってくることが予想されるし，また，車いすでは，体に合わない製品を使用していると逆に内臓疾患などの二次障害を招いてしまうこともある．「モジュール型」車いすとは，車いすを構成する部分を自由に組み替えることにより，製品全体は交換することなく，よりユーザーの使用目的や使用環境（Time Place and Occasion, TPO）に応じた機能を提供することが可能な車いすである．モジュール型車いすは，欧米では主流となっているが，我が国では，高コストであることに加え，適合性への理解度の低さ，段差が多い居住環境などにより，安価で軽量な車いすが選好される傾向があり，ほとんど普及していない．

今回は，3 種類のモジュール型車いすを評価対象とした．No.3 は，レンタル専用の製品で，ユーザーによる背もたれの角度の調整や車輪の高さ調節が可能となっており，適合性の観点からモジュール型車いすとして最低限必要ユーザーによる部品交換，調整はできないものの，同社に依頼すれば，変更が可能となっている．No.5 は，変化するユーザーの身体状態への対応に限らず，ユーザーの好みや TPO に応じて，デザイン性も含めたほとんどの部品の交換や機能追加が可能な製品である．

Table 2.15 には，解体試験結果も併せて示している．同表からもわかるように，車いすでは，結合の大半がネジ類となっている．また，家電製品や電子・事務機器等とは異なり，外装部品がなく解除すべき結合箇所が剥き出しのため，解体作業の経験に左右される要素が少なく，熟練性による実解体時間のばらつきは少ないといえる．さらに，今回対象とした車いすでは，家電製品や電子・事務機器に見られる電子基板のような複雑な素材構成を有する部品がないため，おおよそ単一素材まで分けることが可能であった．ただし，リベットや溶接などのいわゆる「永久結合」が採用されていることによって，単一素材に分けられない部品が各サンプルにおいていくつか存在した．解体試験における前提条件に従い，これらの結合の解除は行っていない．このような永久結合の結合解除指数の決定方法は後述するが，今回は実解体時間に対応した分解性評価指数を得ることを目的としているため，これらは評価に含めなかった．すなわち，Table 2.15 に示す総結合点数，総部品点数とは，解体試験において実際に解除

した，あるいは取り外した点数を意味する．

Table 2.15 Disassembly results of wheelchairs

Sample No.		1	2	3	4	5
Maker		C company	Dcompany			
Classification		Welding type		Module type		
		Steel	Alminum	Rental	Old	New
Mass	kg	19.5	12.1	12.5	8.7	11.5
Wheel size	mm	610	480	480	240	480
Total connection number	parts	81	78	100	80	123
Screw	parts	58	64	78	72	89
Fitting	parts	23	14	18	8	26
Bond	parts	0	0	4	0	8
Parts number	parts	47	37	52	39	67
Disassembling time	s	3260	2842	3052	3294	3061

（2）一結合あたりの結合解除指数平均値と結合点数の比較

以上の結果を基に，車いすの易解体設計に向けた指針を得ることを目的とした検討を行う．Fig.2.3，2.4 に既に示したように，車いすの解体性の向上，すなわち分解性評価指数の低減を図るためには，結合解除に相当する分解性評価指数に着目する必要がある．

Fig.2.11(a)は，結合解除に相当する分解性評価指数 D_d を総結合点数 m で割り，一結合あたりの分解指数の平均値 p_{av} を製品ごとに算出した結果である．p_{av} は次式で算出される．

$$p_{av} = \frac{D_d}{m} \tag{2.5}$$

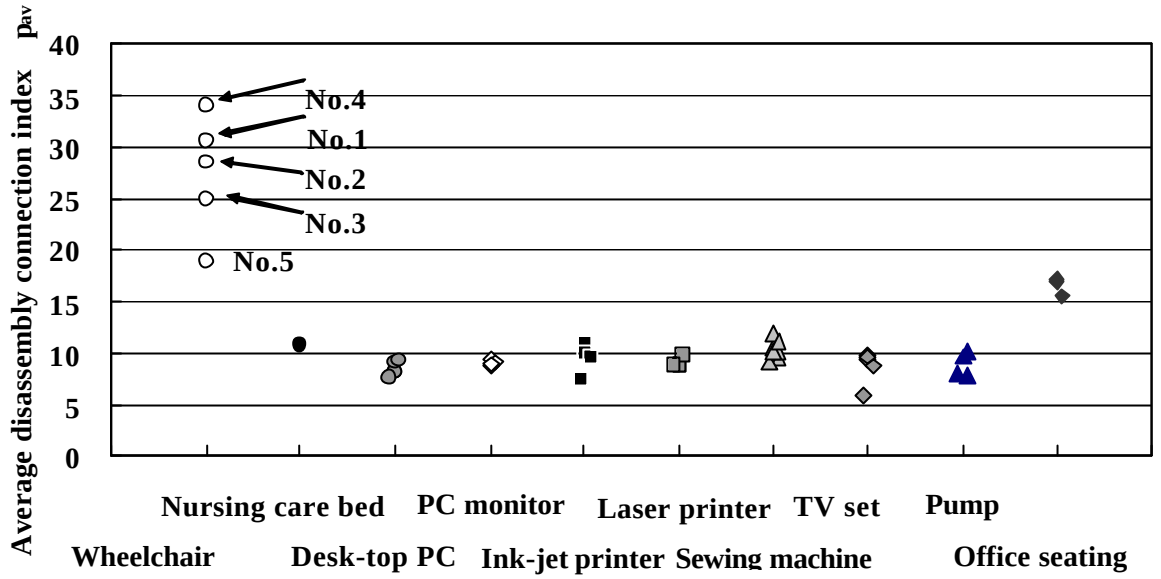
p_{av}：一結合あたりの結合解除指数平均値

D_d：結合解除に相当する分解性評価指数

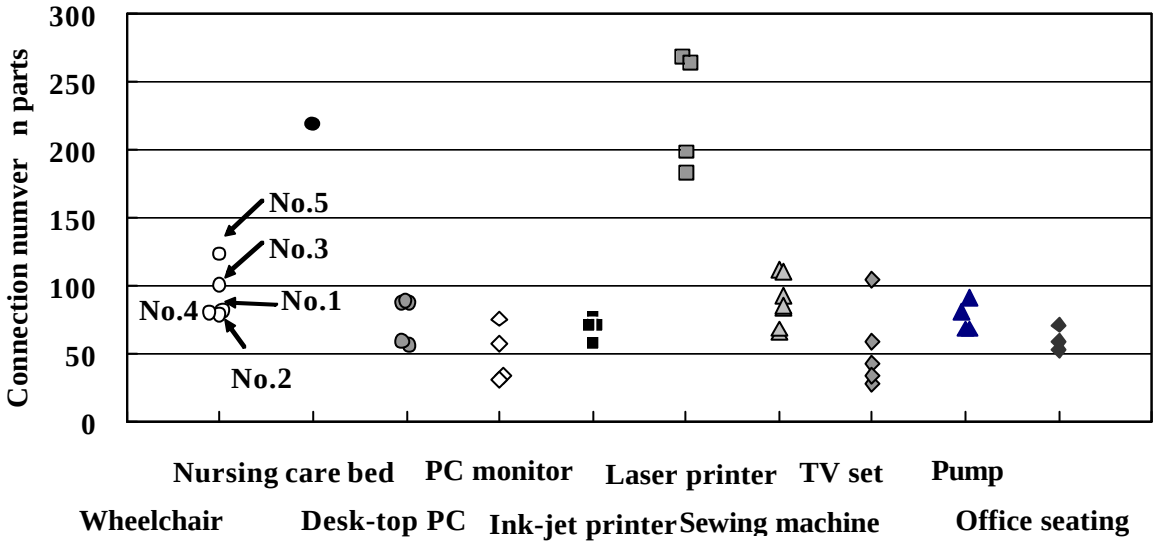
m：総結合点数

車いす以外の製品は，結合解除指数 5 のネジが結合の大半を占めていたため，p_{av} が 5 前後の値におさまっているが，車いすは大幅に大きくなっている．また，同図(b)は，総結合点数 m を同様に図示した結果であるが，車いすの総結合点数は，相対的に少なくなっており，介護用ベッドやレーザ式プリンタとは逆の傾向を示している．介護用ベッドやレーザ式プリンタのように，一結合あたりの結合解除指数平均値が小さく，結合点数が多い傾向の製品に関しては，結合点数の削減が有効であるが，逆に，車いすのように結合解除指数平均値が高く，結合点数が少ない傾向を示す製品では，一結合あたりの結合方法の簡易化を図ることが解体性の向上に有効である．

また，車いすの値に注目すると，サンプル No.5 の結合解除指数平均値が他のサンプルより小さくなっていることが確認された．この点については，次項で詳述する．



(a) Average disassembly connection index



(b) Total connection number

Fig.2.11 Comparison of average disassembly connection index and total connection number

（3）従来製品と新製品の比較

（a）分解性評価指数における「ユニット分離」と「ユニット解体」の内訳と割合

解体試験の工程は，「ユニットを車いす本体から分離する工程」と「分離したユニットを解体する工程」の 2 つに分けることが可能である（以下，それぞれ「ユニット分離」及び「ユニット解体」という）．3R との関連からすると，Reuse を行う場合には，分離したユニットを解体する必要はなく，使用済みとなったユニットに対して別途行えばよいが，Recycle を行う場合には，ユニットを解体し，素材レベルまで分別するのが望ましい．

そこで，分解性評価指数を「ユニット分離」と「ユニット解体」という観点から算出し，評価を試みた．あるユニット u の分離及び解体に要する分解性評価指数をそれぞれ d_{us}，d_{ud} とし，その和を d_u とすると，次式のように表現できる．

$$d_u = d_{us} + d_{ud} \tag{2.6}$$

d_u：ユニット u の分離及び解体に要する分解性評価指数の合計値
d_{us}：ユニット u の分離に要する分解性評価指数
d_{ud}：ユニット u の分離に要する分解性評価指数

なお，d_{us} 及び d_{ud} は，各工程に対応する結合解除，結合探索，部品取り出しの分解性評価指数の合計値として算出される．

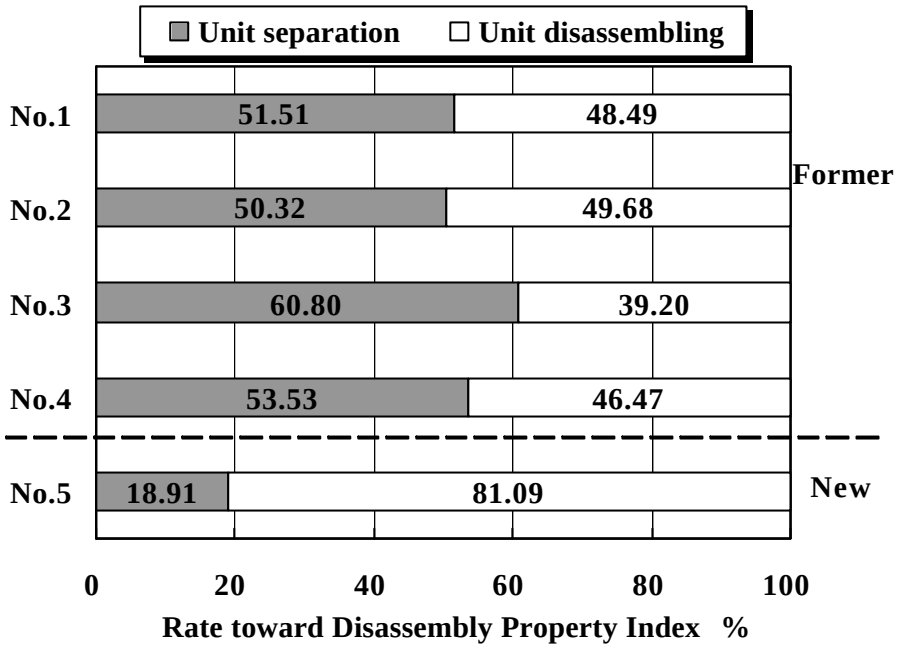
このとき，製品全体の分解性評価指数は，次式に示すように d_u の総和として表現される．

$$D = \sum d_u = \sum d_{us} + \sum d_{ud} = D_{us} + D_{ud} \tag{2.7}$$

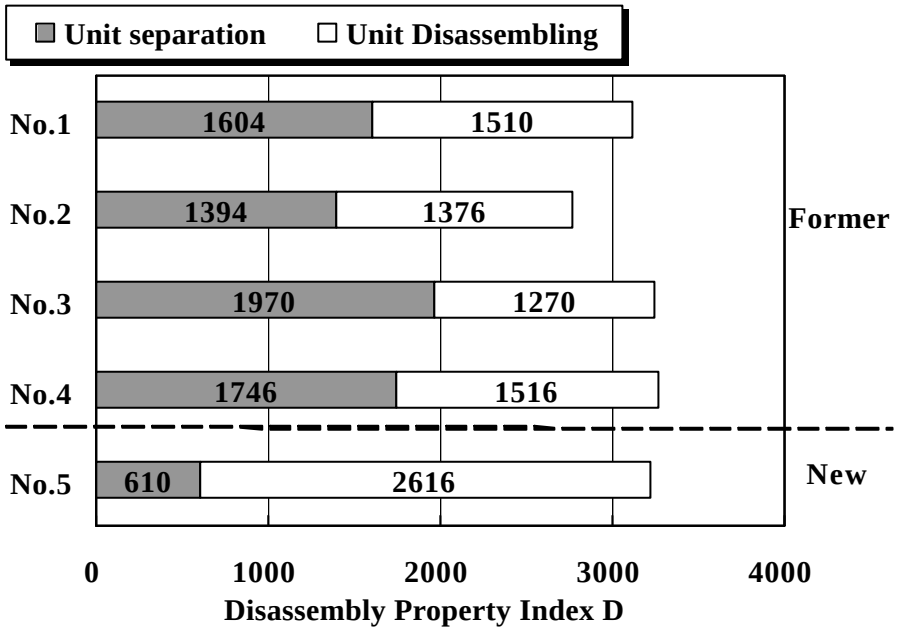
D_{us}：ユニット分離に要する分解性評価指数
D_{ud}：ユニット解体に要する分解性評価指数

当然，上式で得られる D は，式（2.2）で算出される分解性評価指数と一致する．

Fig.2.12 は，以上の計算によって「ユニット分離」と「ユニット解体」という分類に着目したときの，分解性評価指数における各々の内訳（同図(a)）と全体に占める割合（同図(b)）をサンプルごとに示したものである．この図から，サンプル No.5 では，他の 4 台における両者の値及び割合がほぼ同等であるのに対し，明らかにユニット分離に要する分解性評価指数が小さくなっていることがわかる．実際，解体試験においてもサンプル No.5 の「ユニット分離」は他の 4 台と比較しても非常に容易であった．これは，サンプル No.5 が，使用過程における部品（ユニット）の交換を前提に設計されていることによるものであるが，こうした配慮は，Reuse への対応の面でも極めて有利な点であるといえる．このように，同じ車いすでも，新製品では他の 4 台と異なる特徴を有していたので，以下の検討では，サンプル No.1～4 を「従来製品」と称し，これらとサンプル No.5 との比較を行った上で，主に「新製品」であるサンプル No.5 の設計の改善ポイントを抽出する．



(a) Rate



(b) Detail

Fig.2.12 Comparison of “Unit separation” and “Unit disassembling”

(b)「ユニット分離」と「ユニット解体」に着目した従来製品と新製品の比較

Fig.2.13 は，ユニット分離及びユニット解体における各工程の分解性評価指数を,従来製品の平均値と新製品の値を比較して示したものである.新製品は,ユニット分離ではいずれの工程も従来製品より小さくなっているが，ユニット解体では逆に大きくなっている．Fig.2.14 は，ユニット分離及びユニット解体における一結合あたりの結合解除指数平均値と結合点数を示したものである.

新製品は，結合解除指数平均値が，従来製品よりいずれも小さくなっており，結合方法の簡易化がなされているといえる．その傾向はとくにユニット分離で顕著である．結合点数では，ユニット解体において新製品の値が大幅に増加しており，全体でも従来製品の平均値を上回っている．

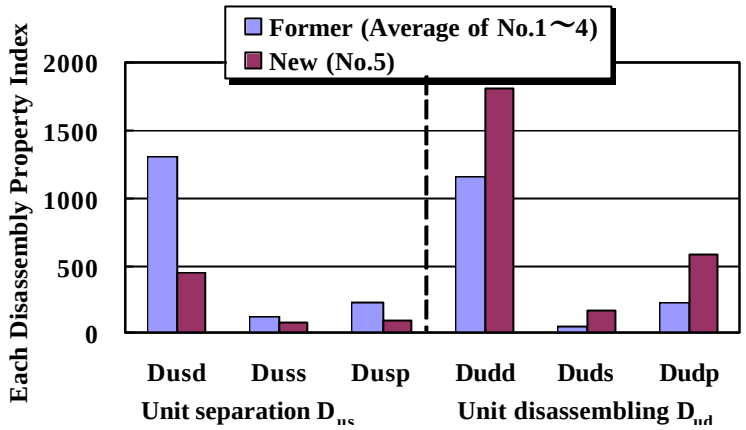
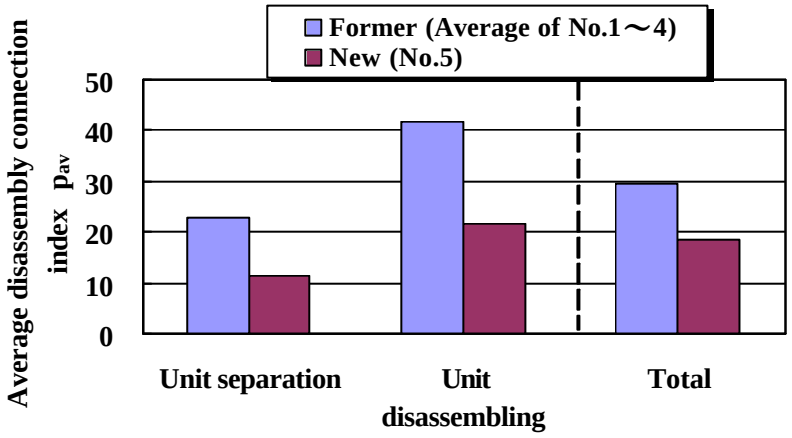
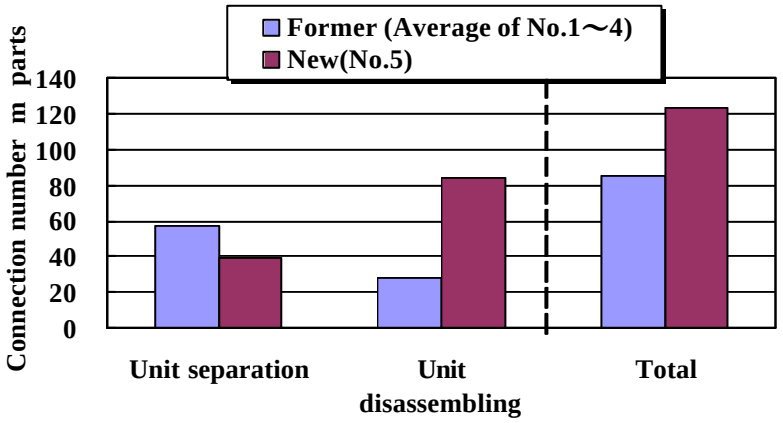


Fig.2.13 Each Disassembly Property Index on “Unit separation” and “Unit disassembling”



(a) Average disassembly connection index

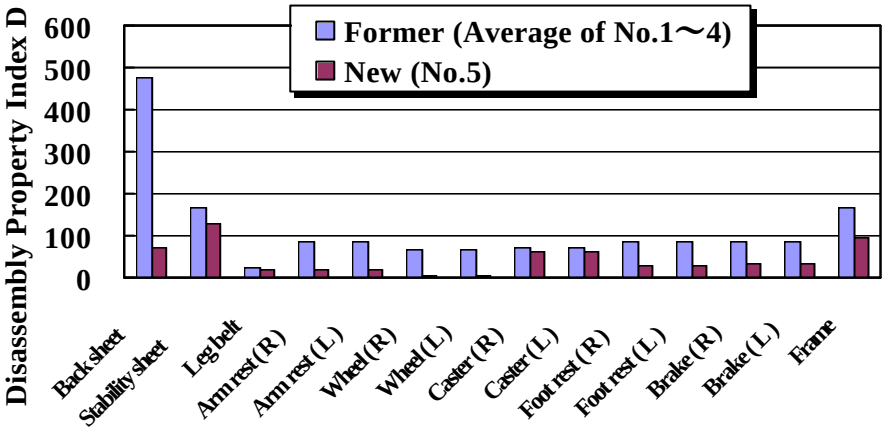


(b) Connection number

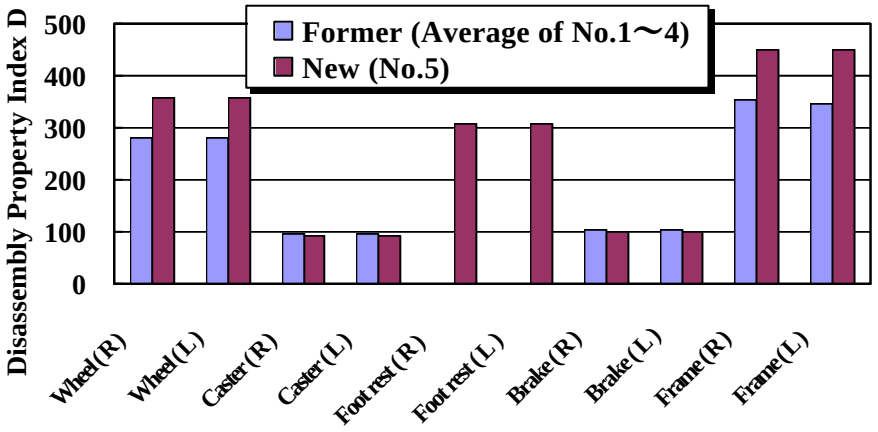
Fig.2.14 Comparison of average disassembly connection index and connection number on “Unit separation” and “Unit disassembling”

（c）個別のユニットに着目した分解性評価指数

以上の検討に基づき，個別のユニットに着目した検討を行うことにより，設計の改善を施す必要のある箇所を特定することを試みた．Fig.2.15 は，各ユニットの分離及び解体に要する分解性評価指数を算出し，従来製品の平均値と新製品を比較した結果である．新製品におけるユニット分離の値は全ての部位で従来製品を下回っていることが判明した．一方，ユニット解体が従来製品と同等あるいはそれ以上の値を示しており，個別のユニットに着目しても同様の傾向があることが確認された．とりわけ，本体フレーム，フットレスト，車輪における分解性評価指数が大きくなっている．以上の結果から，これらのユニットの設計の改善を図ることが新製品の解体性の向上に寄与すると考える．



(a) Unit separation



(b) Unit disassembling

*** The foot rests of former type are made of single material so it is not necessary to disassemble.**

Fig.2.15 Disassembly Property Index of each unit

（d）新製品における設計の改善ポイント

以下，主要な部位につき，構造上の問題点及び具体的な改善ポイントを述べる．

1）本体フレーム

新製品においては，キャスタや車輪の取り付け位置などがユーザーによって変えられるように，調整用のプレートなどが使用されており，これらが本体フレームにおける結合点数及び部品点数の増加を招いている.機能の追加により，結合点数や部品点数が増加するのはやむをえないが，その調整用のプレートやパイプを結合しているネジ類の「方向」に関しては改善の余地があると考える．具体的には，これらのプレートは全て六角穴ネジで結合されていたが，解除を行う際に，パイプが邪魔にならぬよう結合方向を全て外側からに統一することが有効である．締付けトルクが大きいことから，一結合あたりの結合解除指数平均値が大きくなっているが，これは安全性の観点から当然の配慮である．しかし，締付けトルクの大きさよりも，パイプが邪魔になる，あるいはパイプ上のネジを解除する際，ドライバが安定しない，などの「作業の容易性」が結合解除時間の増大に影響している．こうした問題点は，上述のような「結合方向」への配慮で，安全性を損なうことなく改善が可能であると考える.

2）フットレスト

フットレストに関しては，スポンジ状の素材を金属製のパイプから分離するのに，パイプの形状に沿ってスポンジを抜き取る必要があり，その工程に時間を要した．素材の異なる部品であるので，Recycle への対応から脱着式とするなど分離容易な設計とすることが望ましい.

3）車輪

車輪の解体に時間を要したのは，新製品に限らず，従来製品でも共通である．本解体試験では，リムからタイヤの取り外しにマイナスドライバを用いたが，タイヤレバーなどの専用工具を用いることによって解体時間の短縮は可能であると考えられるので，とくに構造上の変更を要するものではない.

（4）車いすの易解体設計の提案

以下，分解性評価指数による定量的な評価結果と解体試験により得られた知見を総合して，車いすの易解体設計の提案を行う．その主な内容を，Fig.3.16 に示し，以下，要点を述べる.

1）従来製品におけるユニット分離の容易化

従来製品では，キャスタやシート類などを結合するネジが内側から結合されているなど，ユニットの分離に際し，作業性が悪いものが多かった．しかし，このような問題点は新製品では改善されていた．したがって，車いすの種別によらず，新製品にみられたようなユニットの脱着の容易性を考慮した設計手法を導入することが望ましい.具体例としては,以下のようなものが挙げられる.

- キャスタを結合しているネジの方向を外側からに統一する.
- 背シートとバックレストをマジックテープで結合する.
- 車輪，アームレストなどを脱着可能なはめ込み方式により結合する（セフティロックを併用）.

2）新製品の本体フレームにおける改善

前項で述べたように，本体フレームにおけるネジ類の結合方向を外側からに統一することが対策のひとつである．さらに，調整用プレートなどの細かい部品

は，周囲のフレームと素材を統一するなどの配慮をすれば，Recycle の際に分離する必要性がなくなるので，結合方法の変更が難しい場合にはこうした対策も考えられる．

3）結合方向を外側からに統一する．

「結合方向を外側からに統一すること」は，本体フレームのみならず，ネジ類により結合されている全てのユニットに有効である．「解体方向を統一する」ことは重要であるが，車いすにおいては，「一方向」に統一すると，パイプなどが邪魔になるため，ユニットが外側に配置されていること及び製品そのものの移動は比較的容易である点を生かし，Fig.3.16 の白矢印に示すように，結合方向を外側からに統一することが望ましい．このような配慮により，工具の十分な可動域が確保され，作業の容易性が大幅に向上すると考える．車いすでは，締付けトルクの大きいネジ類が多用されているため，作業者の疲労度は他の製品と比較しても非常に大きい．こうした観点からも作業の容易性への配慮は重要である．

4）素材や寿命の異なる部品の分離の容易化

サンプルの新旧を問わず，次のような問題により分離できない部品があった．

- グリップ（取っ手部分，磨耗部品）が金属フレーム（構造部品）に圧入されている．
- アームレストの側板（樹脂）とフレーム（金属）がリベットで結合されている．

以上は，結合方法の変更により改善すべきである．

5）解体性と安全性

「易解体性」は，「安全性」や「強度」と逆行するのでは，という指摘をよく受ける．本論文においても，車いすは，一結合あたりの結合解除指数平均値が大きいので，結合方法の簡易化を図ることが重要であると述べた．しかし，「簡易化」とは単に，締付けトルクを小さくし，解除しやすくすることを意味するのではなく，上述のように「結合方向への配慮」によっても大幅に改善されるものであり，これは，けして安全性を損なうものではない．さらに，今回評価対象とした新製品（サンプル No.5）との関連で述べると，同サンプルは，車輪やアームレストが容易に脱着可能となっている一方で，使用時にはセフティロックにより固定できるように配慮されていること，独自のフレームを使用し，強度と軽量化の両立を実現していることなど，その機能の多様性のみならず，安全性に関しても細心の配慮がされた製品なのである．「分離の容易化」や「結合方法の簡易化」などの易解体設計は，「安全性の低下」につながるものではなく，工夫により両立が可能である．しかし，このような前提で，どのような配慮によっても両立できないケースがあれば，「安全性」が優先されるべきである．

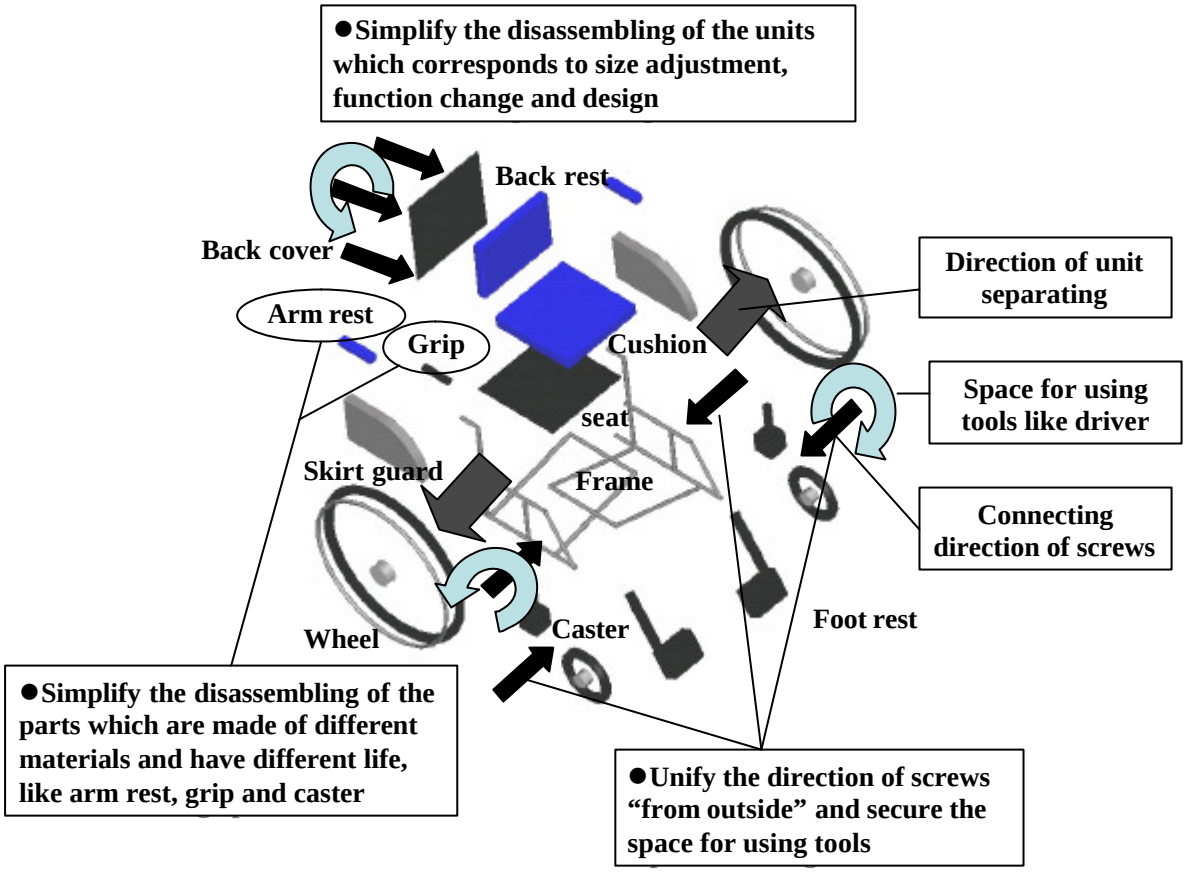


Fig.2.16 Disassembly-Oriented Design (DOD) for wheelchairs

（5）次世代型モジュール車いすの概念

以上の検討により，改善の余地はあるものの全体としては，新製品の解体性が良好であるという結果が得られた．しかし，メーカーでは「環境への配慮」という名目で，設計の改善を行ってきたわけではない．安全性と軽量化の両立に加え，とりわけ「適合性」への考え方を重視し，さらにそれを発展させ，冠婚葬祭，レジャー，買い物などの普段の外出といった TPO に応じて，車いすをファッションの一部とみなすという発想から，車いすの製作を行ってきた．それらが，結果的に「易解体性」という観点からも良好であることが本研究により示されたわけである．「環境」と「福祉」を融合した次世代型モジュール車いすの概念は Fig.3.17 のように整理されよう．本研究で提案した易解体設計を導入することにより，Reuse，Recycle への対応だけなく，従来，メーカーが追究してきた適合性や TPO に応じたデザイン変更のさらなる容易化につながると考える．それは同時に，製品 1 台あたりの使用期間の長期化にも寄与し，環境負荷の低減を実現する．このように，車いすが，適合性・安全性への配慮や，高齢者や障害者にかかわらず様々な人が共に生活することができる社会，いわゆるノーマライゼーションの進展に寄与するツールとして発展していくとともに，環境への配慮という観点からも社会に貢献していくことを期待する．

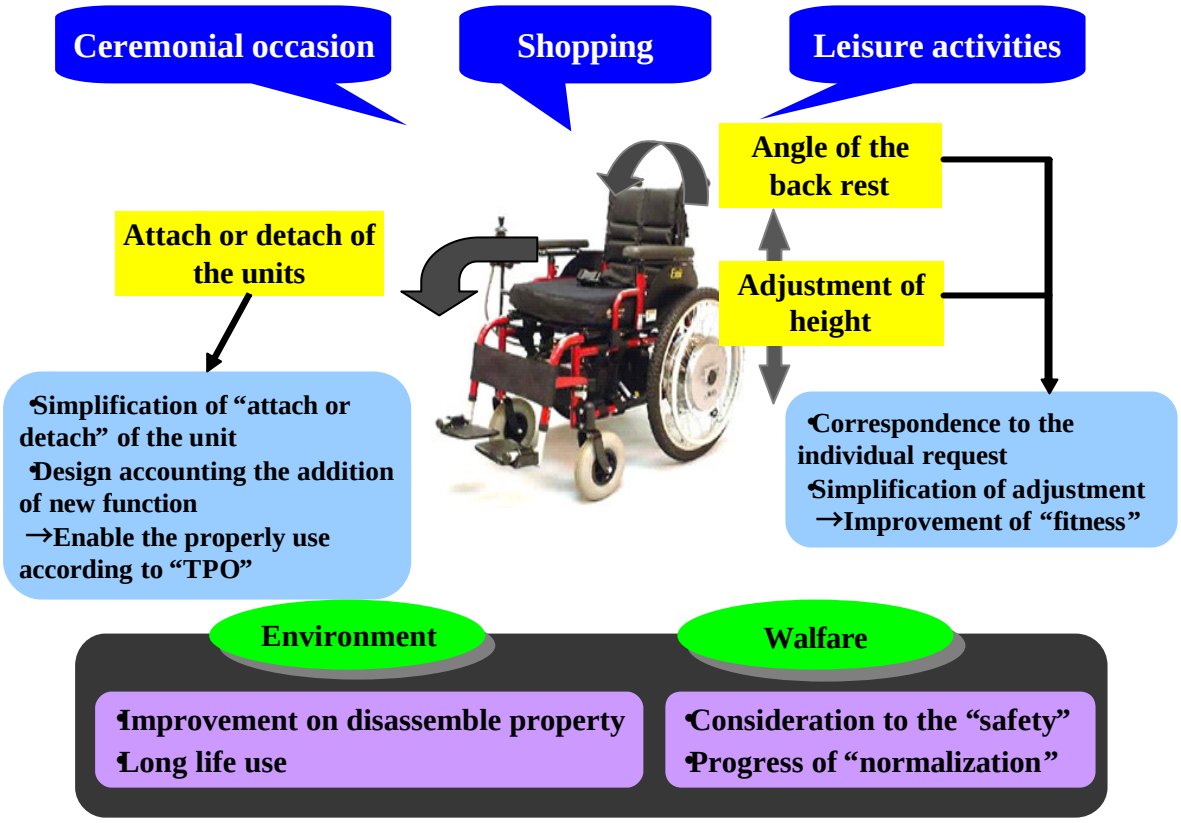


Fig.2.17 A new concept of module-type wheelchair

2．4　分解性評価指数の高度化

2．4．1　解体データに基づく製品の類型化の試み

各種工業製品の解体解析を通し，結合探索の易難が製品によって異なるとの知見が得られており，本研究ではそれを q の値の大小に反映させている．そこで，q と製品データとの関連性を検討し，製品を類型化することを試みた．

まず，結合探索に影響を与える因子として，製品質量および容積が挙げられる．質量が大きいと製品の移動そのものに時間を要し，容積が大きいと解体時に作業者の移動を要するため，結合探索時間が増大する．また，レーザ式プリンタでみられたように，ネジなどの結合や部品が集中的に配置されていると，結合点数は多くても結合探索時間は短くなる．そこで，主成分分析によってこれらを体系的に整理することを試みた．主成分分析とは，多くの変量の値をできるだけ情報の損失なしに，1 個または，少数個の総合的指標（主成分）で代表させる方法である．変量 x_1，…，x_p に対して任意の係数 a_1，…，a_p を用いて，次のような合成変量 z をつくる．

$$z = a_1x_1 + \cdots + a_px_p = ax \qquad (2.8)$$

ここで，$\boldsymbol{a}=(a_1,\cdots, a_p)$，$\boldsymbol{x}=(x_1,\cdots, x_p)$．

この z の分散が最大となるときの値を第 1 主成分といい，p 個の変量をよく代表するものとなる．また，そのときの $\boldsymbol{a}$ を固有ベクトルという [55]．

分析対象の変量としては，結合点数，部品点数，製品質量，製品容積とした．ここでは，Table 2.2 および 2.3 に示した全製品を分析対象とした．主成分分析

より得られた第 1 主成分，第 2 主成分の固有ベクトルを Table 2.16 に示し，第 1 主成分を横軸に，第 2 主成分を縦軸にとった図を Fig.2.18 に示す．

まず，Table 2.16 から第 1 主成分の固有ベクトルの係数は，全て正となっていることがわかる．これにより，第 1 主成分が大きい製品ほど，大型かつ結合点数，部品点数が多くなっているといえる．一方，第 2 主成分では，結合点数および部品点数の固有ベクトルの係数が正の値をとり，質量，容積のそれが負の値をとっていることがわかる．これは，すなわち「結合の集中度」を表しているといえる．また，同表に示す第 2 主成分までの累積寄与率は，84.8%であったことから十分な精度が得られたと考える．

Fig.2.18 において，製品種類と解体試験より得られた結合探索の容易性に着目すると，一定の傾向が得られている．まず，介護用ベッド，車いすといった福祉用具では，第 1 主成分が正，第 2 主成分が負の領域に分布していることがわかる．とりわけ，介護用ベッドに関しては，分析対象とした製品の中では，最も大型であるため，第 1 主成分が大きくなっている．これらの製品は，製品が相対的に大型であるにもかかわらず，結合部の視認性がよい製品群であるといえる．

一方，大型の家電製品であるエアコン，冷蔵庫，洗濯機は，若干のばらつきがあるものの，第 1 主成分，第 2 主成分ともに正の領域に分布している．これらの製品は，大型で製品の解体時に作業者が移動を必要とするため，結合探索時間が大きくなっている製品群である．ただし，テレビに関しては，第 1 主成分，第 2 主成分ともに負の領域に分布していることがわかる．また，類似の構造を有する PC モニタも同様の分布を示している．テレビや PC モニタは，CRT という大型部品を有し，その分解が解体時間の大半を占めるという特徴からこうした特有の傾向が得られたと考える．また，OA 機器である PC 本体や 2 種類のプリンタ，電子レンジや炊飯ジャーなどの小型の家電製品，縫製機械である家庭用ミシン, CD ラジカセやビデオデッキ等の AV 機器は同様の傾向を示していることがわかる．すなわち，第 1 主成分が負，第 2 主成分が正となっている．これらは，分析対象とした製品の中では相対的に小型で，結合点数，部品点数が集中していることから結合探索時間は短くなるという特徴を有する．また，製品サイズが大きくなると第 2 主成分が大きくなっている傾向も読み取ることができる．さらに，汎用ポンプ，送風機，圧縮機といった汎用産業機器は，同図における中央部分にプロットが集中していること，オフィス家具は，第 2 主成分が負となっており，「結合の集中度」という観点からすると，車いすと同様の傾向を有しているということ等がわかる．

以上のように，製品の解体データによって，製品の構造上の特徴を把握できることを示した．逆にいえば，こうした特徴から分解性評価指数を算出する際に必要となる指数を決定できれば，設計段階で入手可能な情報のみで様々な製品に適用可能な分解性評価指数を得ることができる．

その際，Table 2.17 に示すような製品分類を考慮することで，評価の利便性が増すと考える．Fig.2.18 で示した結果より，OA 機器，小型家電，AV 機器，縫製機械は，同様の傾向の特徴を有すると述べたが，これらはその製品カテゴ

リーから予め分類しておいた方が評価実施者にとってわかりやすい．したがって，それぞれを個別に分類することとした．また，PC モニタ，テレビに関しては，製品種類でいえばそれぞれ OA 機器，家電製品に属するが，先に示したように，これらの製品は特徴的な構造を有するので個別に分類することとした．その他は，大型家電製品，福祉用具，汎用産業機器，オフィス家具等のように製品種類に対応する形で分類した．　なお，ここに示した分類は，後述する結合探索指数 q を決定する際に活用することとなる．

Table 2.16 Eigenvector coefficient of each principal component

Variable			1st principal component	2nd principal component
Connection number	M	parts	0.692	0.652
Parts numer	n	parts	0.864	0.324
Mass	M	kg	0.749	-0.502
Volume	V	m^3	0.785	-0.451

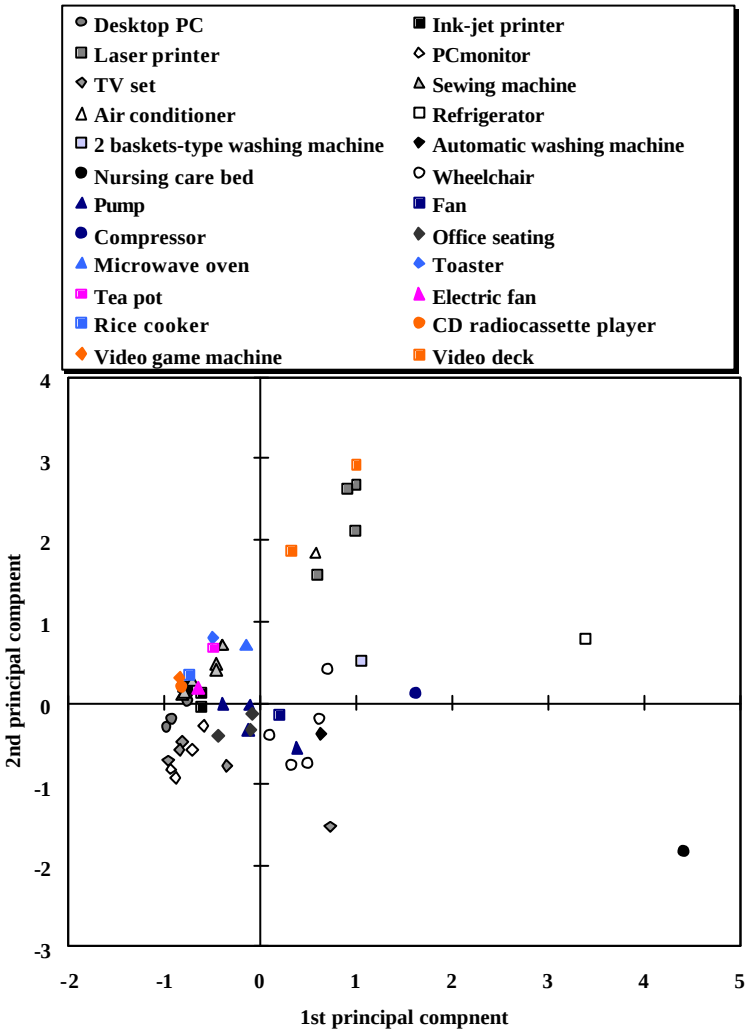


Fig.2.18 Relation between 1st principal component and 2nd principal componet got by disassembly data of industrial products

Table 2.17 Classification of the products

Product Class	Principal Products*
OA apparatus	PC, Scanner, Facsimile, Copy Machine
TV set and PC Monitor	TV set, PC monitor
Large-scale home appliance	Refrigerator, Washing Machine, Air Conditioner
Small-scale home appliance	Toaster, Teapot, Microwave Oven, Electric Fan, Rice Cooker, Iron, Electric Stove, Air Cleaner
AV apparatus	Radio Cassette Player with CD, Video Deck, DVD player, Digital Camera
Sewing machine	Home sewing machine, Industrial sewing machine
Welfare equipment	Wheelchair, Nursing care bed
Industrial Machine	Pump, Fan, Compressor
Office furniture	Office Seating, Rack, Table

* The underlined products are included in the disassembly experiments' samples.

2．4．2　各指数の決定方法

（1）結合解除指数 p_i

これまでは，ネジ類，はめ込み類，接着類などのように結合方法に基づいて対応する指数を決定していた．しかし，結合解除時間は，同じ結合方法でも使用する工具によって大きく異なることから，使用する工具によっても分類可能であるような指数化の方法を検討した．対象を拡張していくことによって，分類数は増えていくものと予想されるが，解体試験の経験上，現段階で分類が必要と思われる結合方法及び使用工具は，Table 2.19 **に示すとおりである．結合解除指数 p_i は，同表の結合方法と使用工具を組み合わせ，グループ化し，そのグループごとに対応する平均結合解除時間を割り当てることによって行う．当然ながら，同表における結合方法と使用工具の全ての組み合わせが存在するわけではなく，現段階で判明している組み合わせは，**Table 2.20 **に示す 30 通りである.この組み合わせを結合方法及び結合解除時間を基に整理した結果が** Table 2.21 **であり，ここに定義した各結合種類の平均結合解除時間が，結合解除指数 p_i となる．従来は，最長結合解除時間の** 1/2 **の値を結合解除指数としたが，利便性・簡便性を考慮し，平均結合解除時間を** pi **と再定義することとした.**

Table 2.19 Classification of connection method and tools

Mark	Connection Method	Mark	Tool	Mark	Tool
A	Screw	a	Driver (+, －)	h	Crescent Wrench
B	Fitting	b	By hand	i	Specific Driver
C	Bond	c	Nipper	j	Hammer
D	Connector	d	Allen Wrench	k	Attack Driver
E	Place	e	Long-nose Wrench	l	Gear Puller
F	Fixed by Wire	f	Spanner	m	Snap Ring Pliers
G	Snap Ring	g	Ratchet	n	Pipe Wrench

Table 2.20 Combinations of connection method and tools

Connection Method	Tool
A	a+,b,d,f,g,h,i,j,k,n
B	a-,b,c,e,i,j,l
C	a-,b,c,e
D	a-,b,c,e
E	b
F	b,e
G	a-,m

Table 2.21 Definition of connection disassembly index p_i

Connection Method		Tool	Connection Class (Definition)	Connection Disassembly Index p_i
Screw	A	a+,b, i	Cross socket set screw Screw which is able to disassemble by hand	10
		d	Hexagon socket set screw	14
		f,g,h	Hexagonal bolt	30
		j,k,n	Hard screw	55
Fitting	B	b	By hand	2
		a-,c,e, i, j	By tool	7.5
		l	Gear Puller	71
Bond	C	b	By hand	3
		c	Cutting	1.5
		a-,e	By tool	13
Connector	D	b	By hand	2.5
		a-,c,e	By tool	12
Place	E	b	By hand	0
Fixed by Wire	F	b,e	By hand	3.5
Snap Ring	G	a-,m	By tool	21.5

（2）結合探索指数 q

結合探索時間は，作業者の熟練性や解体対象製品に関する知識の有無に左右され，変動が大きい値である．しかしながら，本研究では，結合探索に要する時間は，製品の構造上の特徴と関連性があるとの観点から，その定量化を試みてきた．本研究では，結合探索時間に影響を与えると考えられる製品データ（解体データを含む）を説明変量とし，実測した結合探索時間を目的変量として重回帰分析を行い，製品種類ごとに q **を算出する回帰式を求めている．** q **の算出式を一般化したものを以下に示す．**

$$q = a \times m + b \times n + c \times M + d \times V + e \qquad (2.9)$$

ここで， q **：結合探索指数 [/個]**

m **：結合点数[個]　** n **：部品点数[個]**

M：製品質量[kg]　V：製品容積[m^3]

a，*b*，*c*，*d*，*e*：各説明変量に対応する偏回帰係数

すなわち，結合探索時間は，結合や部品の点数及び質量，容積によって異なってくることを意味する．例えば，結合が集中していれば，探索に要する時間は少なくなるであろうし，また，製品が大型であると結合部の探索に多くの時間を要するということである．これらの説明変量は，逐次法[46]による検定と解体試験上の経験から必要であると考えられる要素を取り込むことにより決定した．逐次法は，説明変量の選択方法のひとつであり，目的変量との単相関が最大の変数を選び，選ばれた変数に対する偏回帰係数が 0 であるという仮説の検証を行う．この仮説が，棄却されなければどの変数も重回帰式に含めず，棄却されれば，この変数を取り込んで次の説明変量に関して同様の検定を行うことによって，説明変量を絞り込む方法である．説明変量を絞り込んだ結果，得られた変量は，結合点数 m 及び部品点数 n の 2 つとなったが，上述のように，製品の質量 M 及び容積 V も結合探索時間に与える影響が大きいことから，変量として取り込むこととした．

さらに，製品の種類によっても各説明変量の影響度合いが異なることが判明しているため，現段階では，Table 2.22 に示すように電子・事務機器や家電製品など製品種類ごとに分類し，各々に対し，偏回帰係数を割り当てることとしている．製品種類ごとの偏回帰係数は Table 2.23 に示すとおりである．

Table 2.23 Regression coefficient of each explanatory variable on multiple regressions for calculating Connection Searching Index q of several industrial products

Explanatory Variable	Connection Number	Parts Number	Mass	Volume	-
Products	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*
OA apparatus	5.36E-02	2.42E-01	9.10E+00	-2.66E+03	-3.66E+01
TV set and PC Monitor	3.13E-02	-3.90E-03	1.81E-01	-4.41E+01	1.16E+00
Large-scale home appliance	-1.39E-02	-5.49E-02	7.28E-02	-9.74E+00	5.29E+00
Small-scale home appliance	3.68E-02	168E-02	2.13E-01	7.46E+00	3.68E-01
AV apparatus	6.85E-02	4.81E-02	-2.58E+00	7.83E+02	-3.06E+00
Sewing machine	-4.40E+00	-3.77E+01	5.60E+01	1.05E-05	1.85E+03
Welfare equipment	-1.54E+01	8.83E+00	3.43E+01	5.26E+02	1.32E+03
Industrial Machine	6.19E-04	-1.26E-02	5.10E-03	-9.84E+00	4.61E+00
Offcie furniture	-1.39E-01	3.49E-01	-9.23E-01	-1.02E+01	1.30E+01

（3）部品取り出し指数 r

部品取り出し指数 r も結合探索指数 q と同様の考え方に基づき，算出式を作成した．しかし，部品取り出し時間に関しては，Fig.2.20 に示すように，結合探索時間とは異なり，製品種類による明確な違いが見られなかったため，一律

に次式より算出することとしている.

$$r = 0.285 \times \overline{M}p + 2.248 = 0.285 \times (M / n) + 2.248 \quad (2.10)$$

ここで，r：部品取り出し指数[/個]

$\overline{M}p$　：平均部品質量 [kg/個]

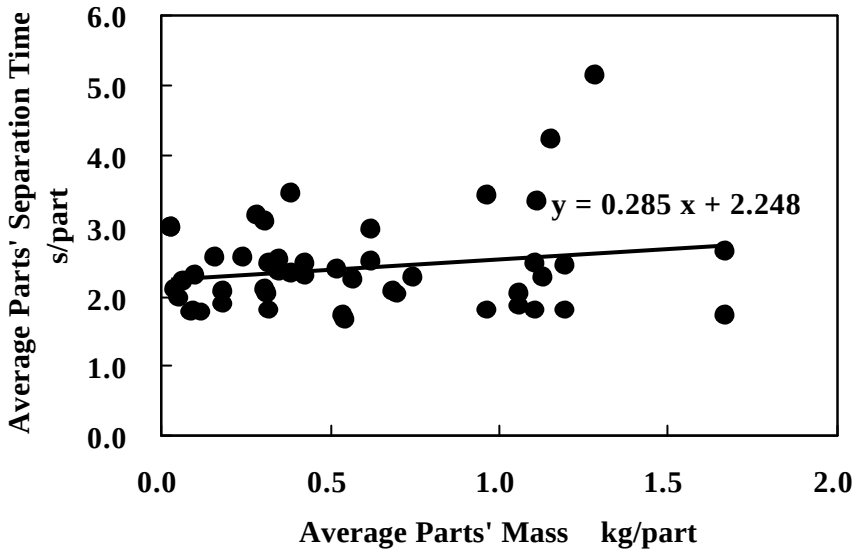


Fig.2.20　Comparison between average parts' mass and average parts' separating Time

2．4．3　分解性評価指数と実解体時間の関係

以上により，製品の解体データにより，分解性評価指数 D を算出することが可能となる．Fig.2.21 に各種工業製品の分解性評価指数と実解体時間の関係を示す．同図では，分解性評価指数と実分解時間が 1：1 となる直線を図示している．また，参考として誤差の範囲が 20%であることを意味する直線（破線）を併せて示した．このように分解性評価指数は，実解体時間とおおよそ比例関係にあるとことが確認され，実解体時間に相当する指数としての有効性が示されたといえる.

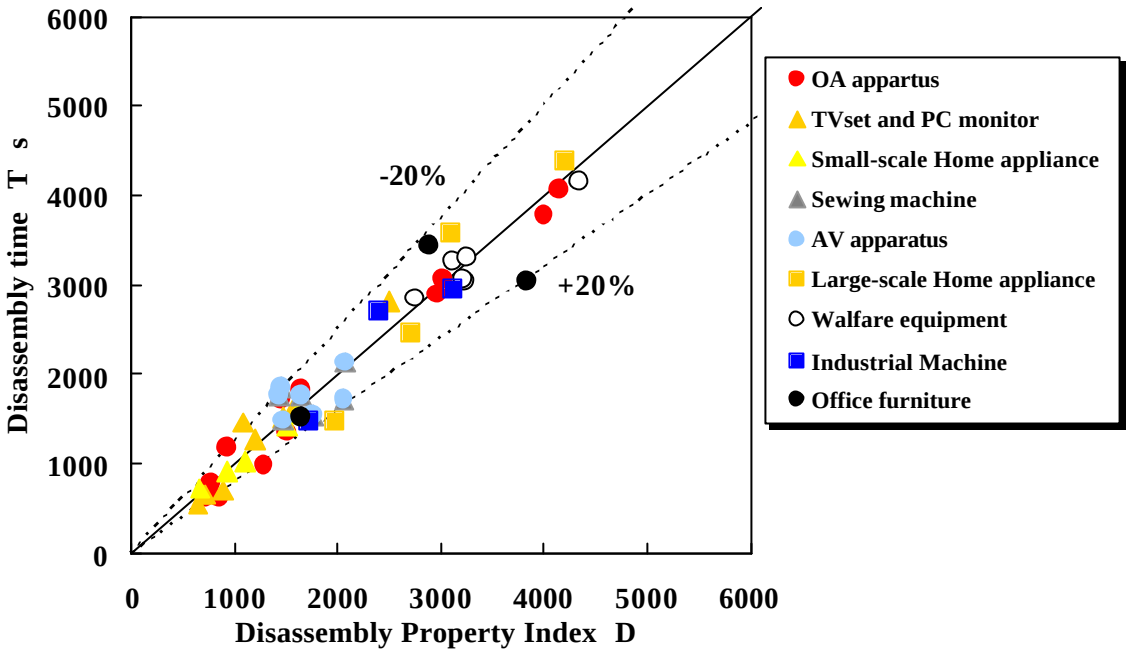


Fig.2.21 Comparison between Disassembly Property Index and disassembly time

2．5　解体支援ソフトウェアの開発

2．5．1　基本コンセプト

本ソフトウェアは，解体情報と CAD データ，使用工具や結合種類などによって解体手順の指示を行うことで，解体・分別工程の効率化を可能とすることを目標としている．リユース，リサイクルといった分別判断基準に関しては，現段階では明確化することはできないが，将来的には使用履歴，すなわち特殊 IC タグに記録された運用情報（第 5 章参照）との連携も考慮し，分別に関する情報も入手できる仕様とした．

本ソフトウェアでは，解体の手順を示す解体フローをデータベースとして登録し，解体に際する解体時間，すなわち，分解性評価指数の自動計算が可能とする．前述のように本フローを中核に，3D－CAD などの様々な情報と連動し，将来的には Web 展開の解体マニュアルの作成に寄与するものとした．また，解体･分別工程のみならず，設計者が製品の分解性評価を可能することも想定し，一度作成した解体フローにおいて，部品等の入れ替えを行える仕様とした．

2．5．2　ソフトウェアの構成要素

（1）解体フローの定義

（a）基本コンセプト

解体フローは，製品の解体分解の工程をツリー状に表現することで簡易に表示し，このフロー上に解体に必要な様々な情報を盛り込むと同時に，その工程の評価を可能とする．

本ソフトウェアは，本フロー上に解体イメージ表示や解体工具等の情報をハイパーリンクで展開していくこととしており，本フローはシステムの中核をな

すものである.

解体の工程の効率化を考えた場合，特定の部品を取り出すときに，全ての部品を解体する必要はなく，必要最小限の解体作業を行うことが効率的である．A 社製ステンレス製渦巻きポンプの解体フローを記述すると Fig.2.24 のように示される．こうしたフロー上の表示を基に，特定の取り出し対象部品を選択することで，解体のプロセスが理解できるシステムが有効である.

（b）フローのアドレス

Fig.2.25 に示すように，フローツリーは本体を頂点に徐々に部品，ユニット（部品 2 つ以上で構成）に分解されていく順序を意味する（後に述べるプログラム上，ユニットと部品の区別はないが，説明上は区別して記述する）.

横系列がユニット内の解体時系列を示し，同一ユニットから横への枝は，解体に優先順位がないことを示す．逆に縦系列をユニット，部品の解体の時系列を示し，縦の枝は解体の順位の従属性を示す.

部品ナンバーは従属性を分かりやすくするために，便宜上付けたナンバーであり，部品の入れ替え，組み替えでルール通りにナンバーでなくなる可能性もある．このためシステムへの部品登録はその従属性（親）を入力し，関係性が切れないようにする．この際，親として「解体親部品」,「構成親部品」の 2 つの親を入力することとなる．前者はその部品に至る枝の従属性であり横の繋がりである場合もあれば，縦の枝の繋がりである場合もある．後者は解体順位を気にしない構成上の親である.

（c）部品ごとの登録情報

部品ごとの登録情報は前述の ID 情報の他に，部品名称，解体工程（解体方法），3R の種別（リユース，リサイクル等），従属性などで，さらに対象の製品によってカスタムで登録情報を増やすことも可能である.

これらの登録情報を基づき，分解性評価指数の計算を行うことになる．選択部品（ユニット）に対して親をたどり，本体に至る経路を検索，順次指数の和をとることとなる.

さらに，フローツリーデータは汎用ソフトウェアである Microsoft EXCEL データ形式あるいは Web 展開可能な HTML 形式に書き出しが可能で，HTML 形式については部品ごとの指数が自動計算され結果が部品からのハイパーリンクでの表示を可能とする（Fig.2.26）.

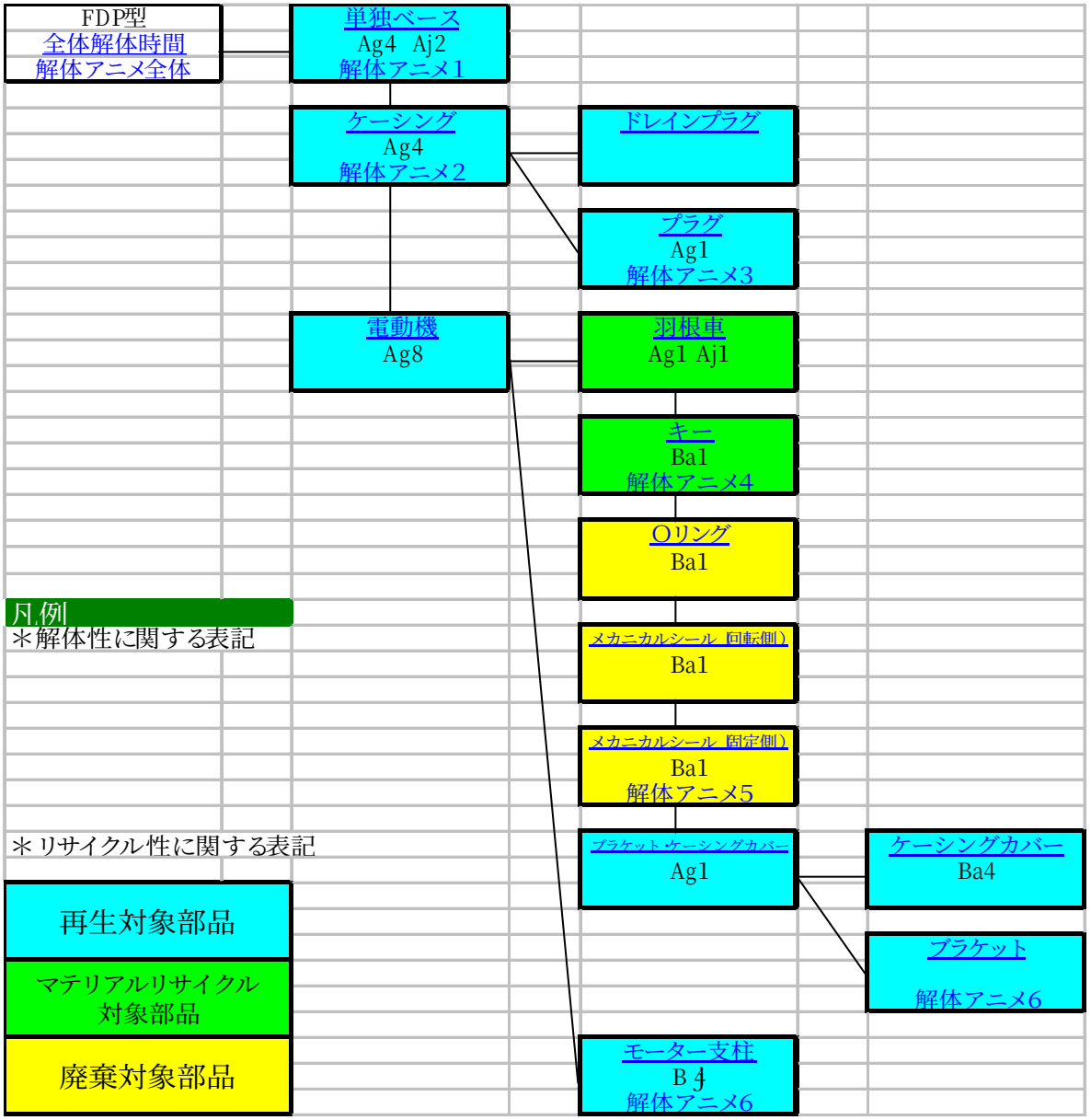


Fig.2.24 An example of disassembling flow

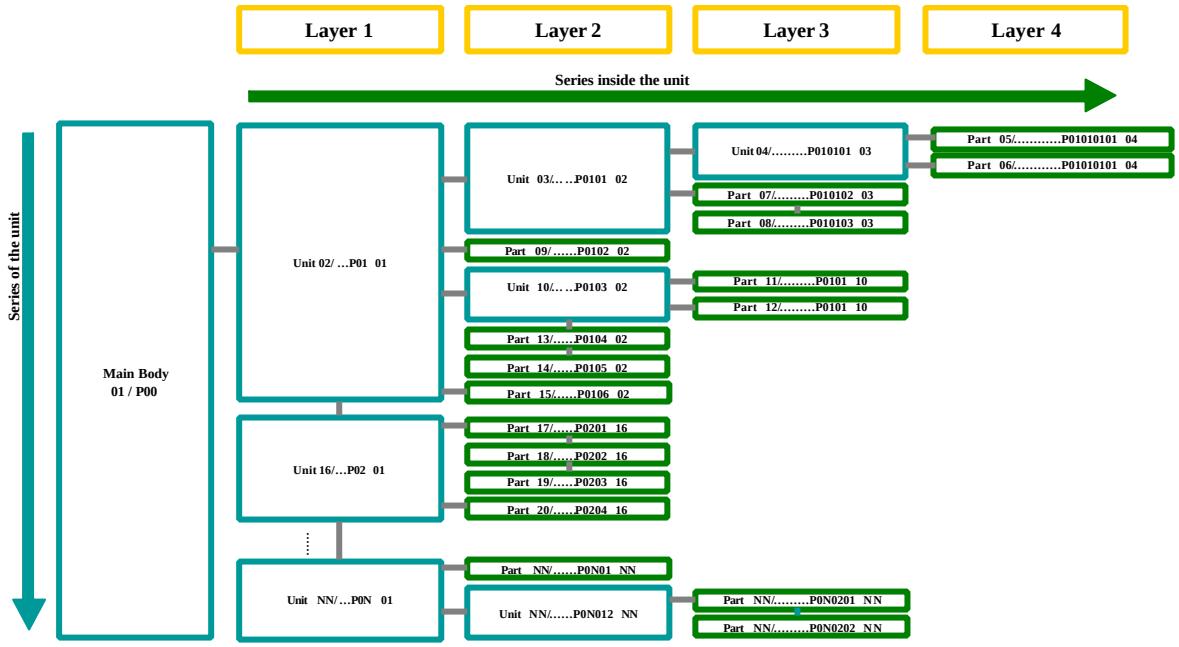


Fig.2.25 Address of the disassembling flow

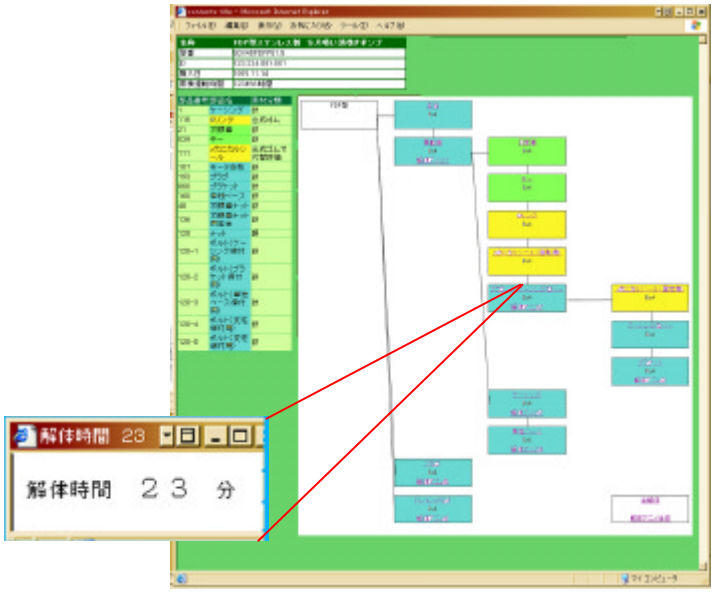


Fig.2.26 Indication of disassembling time

（2）3D-CAD データとの連携

（a）基本コンセプト

従来の製造業では，製品品質向上やコスト削減を目指して設計の三次元化（ CAD / CAM / CAE の導入）が行われている．しかし，この 3 次元データが利用されているのは，大部分は設計部門にのみに限定されており，製品のライフサイクルにわたる利用はなされていない．

近年の取り組みとして，3 次元データを保守部門・営業部門など有効に活かし，デザインレビュー・ペーパーレス 3D マニュアルとして展開する取り組みが行われ始めているが，その利用価値については開発途上であり，さらなる検

討が必要であるといわれている．また，こうした情報利用は，解体・リサイクル過程への利用および開発はなされていない．

本研究で対象としている汎用ポンプの製造現場においても，2 次元 CAD データの生産現場における利用はなされているものの，メンテナンスや解体，修理の現場では紙ベースの 2D 模式図を用いたマニュアルが使われている程度であり，設計・生産現場の情報が有効に生かされていないといえる．

本研究開発では，特殊 IC タグシステムにより，機器の運用・保守情報をこれに収集・蓄積し，省エネ診断など適正な機器の運用や保守・管理体制の効率化が実現されるだけでなく，それらの情報の連携により，解体・分別工程の高機能化・省力化が可能となることを検討している．しかし，これらの情報は多岐にわたり，その情報量の多さ，データ利用の困難さから，従来手法による情報表現では困難になると考えられる．

そこで，これらの情報を整理し，表現する上で 3 次元データを有効に活用していくことが求められる．本ソフトウェアでは，3 次元 CAD データの有効利用を検討し，そのシステムデザインの提案を行うこととする．

（b）現状の 3D-CAD の問題点と XVL 方式の有効性

現在，3 次元データが，様々な現場に活用されていない原因には，以下のような要因が考えられる．

- 3 次元データは巨大であり，様々なネットワークを介しての利用は難しい．
- CAD ソフトは高価で難解であるために，一般の PC ユーザーが手軽に利用できない．
- CAD にはソフトにより様々なデータ形式があり，ソフト間でのデータの再現性に問題がある．

以上のような問題を背景に，インターネットにかかわる国際規格 Web3D コンソーシアムでは，1997 年に VRML を国際標準規格として認定したが，圧縮率，再現性の問題で，実用レベルでの利用はごく限られた分野でしか利用されていない．そこで，次世代の Web での利用を目的とした 3D 規格として，X3D（eXtensible 3D）の策定が行われている．

この X3D の有力な候補のひとつとして，XVL 方式が挙げられる．XVL 方式は慶応義塾大学 環境情報学部 千代倉弘明 教授の考案した，単純な形状から滑らかな曲面を表現するというラティス構造を利用した形状表現をベースとしている．本研究では，XVL の持つ以下の特徴に注目し，このデータフォーマットを採用した 3 次元 CAD データの有効利用方法を検討した．

- XVL は VRML などのフォーマットに比べ，格段にデータ圧縮が可能である（特に XVL は円形，球形など曲面の形状データの圧縮に効果的である）．
- データ精度が保持される（10^{-1} ～ 10^{-3}mm の精度があり，現在検討している解体対象機器へのデータ受け渡しなどの精度には充分である）．
- 形状データの他に，数値データ，文字データの併記が可能である（部品ナンバー，素材情報などの併記も可能）．
- アニメーション定義が可能である（解体マニュアルとして有効）．
- 現時点ではビューアーのダウンロードが必要（無料で提供されている）で

あるが，他の CAD 系ソフトへのデータ受け渡しは，汎用性があり再現性がある．

（c）3D データの XVL 化によるデータリダクション

汎用性の高い 3D-CAD データのデータ形式は，その多くがポリゴンデータとなるが，一般的に高い精度形状をもったポリゴンデータ（DXF，VRML 等）はデータ容量が膨大となり，本研究で検討しているネットワーク配信には適さない．

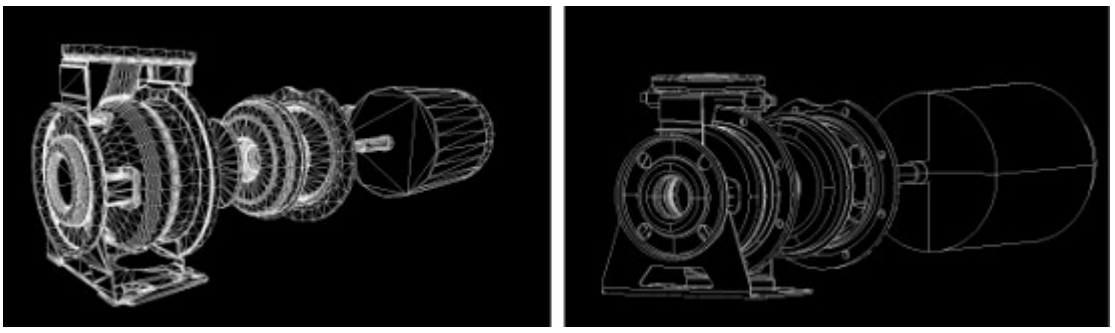
そこで，ベクターデータであり，かつ汎用性のあるフォーマット形式が要求される．本研究では，こうした問題をクリアしたファイル形式として XVL 形式を選択し，その特性を検証し，汎用ソフトウェアを用いた変換方法を確立することを目指す．

本研究では，汎用ポンプの 3D 形状データを 2D-CAD データより作成したが，本来は既に 3D データであるものを，XVL データに加工する方策を検討する．

使用するソフトウェアは比較的安価な汎用ソフトウェアとして「form･z」ととし，これから汎用性のあるデータ形式である DXF 形式データを生成する．以上の条件に基づき，様々な手法を検討した結果，高価なソフトウェアを導入することなく，効率的にデータサイズの圧縮を図ることが可能な方式として以下のような方法で行った．

「AutoCAD」の標準として使用されているベクターデータ形式には IGES（2D/3D）/STEP（3D）ファイルがある．「form･z」から書き出し可能なベクターデータは IGES に限られている．そこで，IGES データから XVL に変換可能なソフトウェアとして Photoron 社の「図脳 Rapid3D」があり，それを利用した．

Fig.2.27 に示すように「Rapid3D」による IGES ファイルからの XVL 書出しをテストしたが，データ量が格段に落ちていることがわかる．



(a) DXF (467kB)　　(b) Vector data (169kB)

Fig.2.27 Comparison of XVL data between DXF base and vector data base

（d）XVL による分解アニメーション表示

XVL 仕様書より，以下の 2 点が XVL によるアニメーションを実現するための方法として挙げられる．

・ XVL ファイルの各オブジェクトに用意されたメソッドを利用して，スクリプトによって外部からアニメーションを制御する（メソッド・アニメーシ

ョン).

・ XVL ファイルフォーマットに基づき，XVL ファイル内部にあらかじめキーフレーム・アニメーションを付加する．対象オブジェクトのメソッドにより開始・終了を指示する（登録アニメーション).

本研究では，これらのうち，前者のメソッド・アニメーション方式を採用した．XVL Player のアニメーション制御用のスクリプトには，HTML に直接表記することのできる JavaScript を使用した.

JavaScript によるワークフローを以下に示す.

①モデルの部品ごとのユーザーID 付加

②XVL Player オブジェクトの HTML への埋め込み

③アニメーション付加

3D-CAD データのアニメーションに必要とされる動きの種類は，移動及び回転の 2 種類である．そして，座標関係の値も絶対値と相対値の 2 種類がある．解体アニメーションの再生を一回のみする場合，移動のための部品の座標からの相対移動値, 中心点及び回転角度の相対値の設定によって解体を表現できる．しかし，アニメーション再生を繰り返す場合には，一度部品を元の座標に戻す必要があるため，アニメーションする部品ごとの絶対座標値，回転の場合は指定した姿勢の絶対値を指定する必要がある．Fig.2.28 は相対値のみを利用した XVL アニメーションの HTML ソース中のスクリプトの役割を説明したものである.

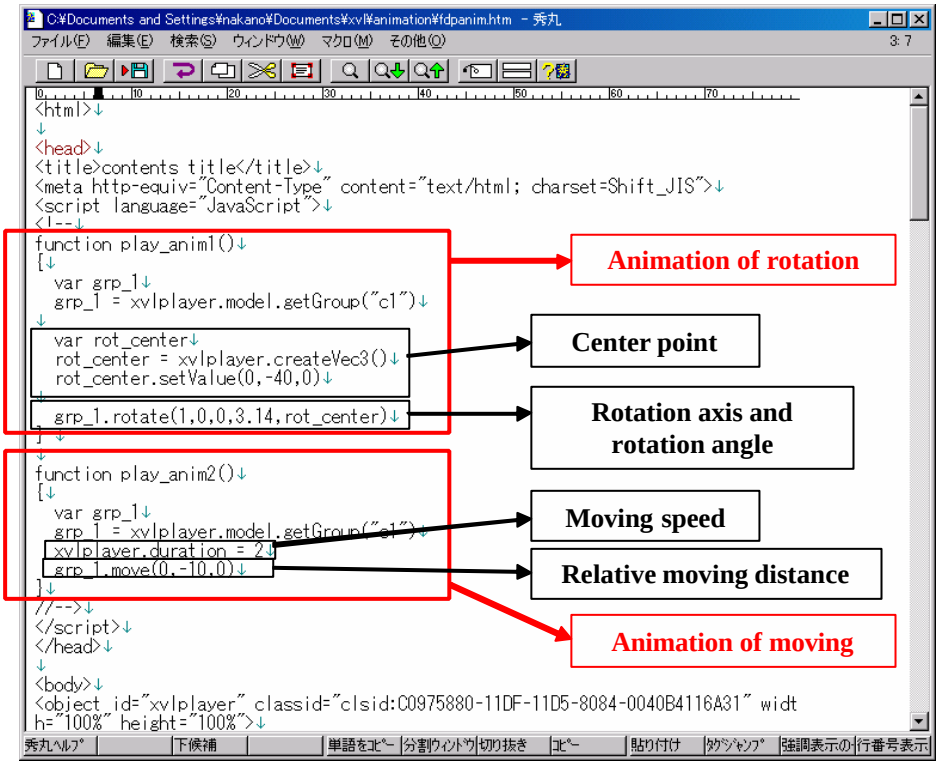


Fig.2.28 Animation control source code by “ JavaScript ”

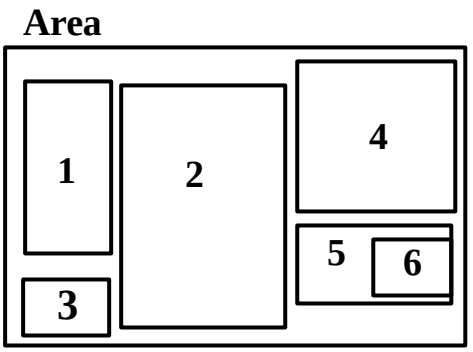
（e）イベント処理

XVL Player 側の情報をスクリプト側に伝達するのがイベントである．アニメーション終了処理などの無条件に発行されるもの以外は，XVL ファイルに発行するイベントの記述が必要とされる．また，スクリプト側にはイベントを処理するイベントハンドラの記述が必要とされる．

2．5．3　ブラウザ設定のコンセプト

以上の検討をもとに，開発した解体支援ソフトウェアのブラウザイメージを Fig.2.29 に示す．エリア 1 には部品の一覧を示し，リユース，マテリアルリサイクル，廃棄対象の別を色分けで表示する．また，エリア 2 には解体・分解フロー図が表示され，リスト，フロー双方からリンクする形で，エリア 3～6 が表示される．エリア 3 にはそれぞれの部品に至る解体時間（分解性評価指数）が表示される．加えてエリア 4 には対象パーツに至る解体工程を 3D ビューアーでアニメーション表示を行えるよう XML ベースのデータで配信を行う．さらに，エリア 5 には，対象パーツの詳細情報が表示される，解体用の工具，ネジピッチなどの情報を提供する．さらに，アニメーションなどで表現されにくい情報はエリア 6 にムービーとして表示される．

本システムは，将来的な特殊 IC タグシステムとの連携を考慮し，機器の使用履歴から，部品がリユース可能であるか，あるいはマテリアルリサイクル対象であるか，という識別情報を表示する機能も有している．また，作成された分解フロー図と 3D-CAD データと連携することにより，3D アニメーションによって視覚的に分解手順を提供することができる．以上のような配慮によって，分解・解体マニュアルの Web 展開が実現できるだけでなく，本システムは，設計者にとっての分解性評価支援ツールとしても活用可能である．また，そのままの形で他の製品への応用でき，汎用性の高いツールであるといえる．



1 :Parts list with 3R information
2 :Disassembling flow
3 :Disassembling time
4 :3D animation
5 :Details about disassembling method
6 :Movie

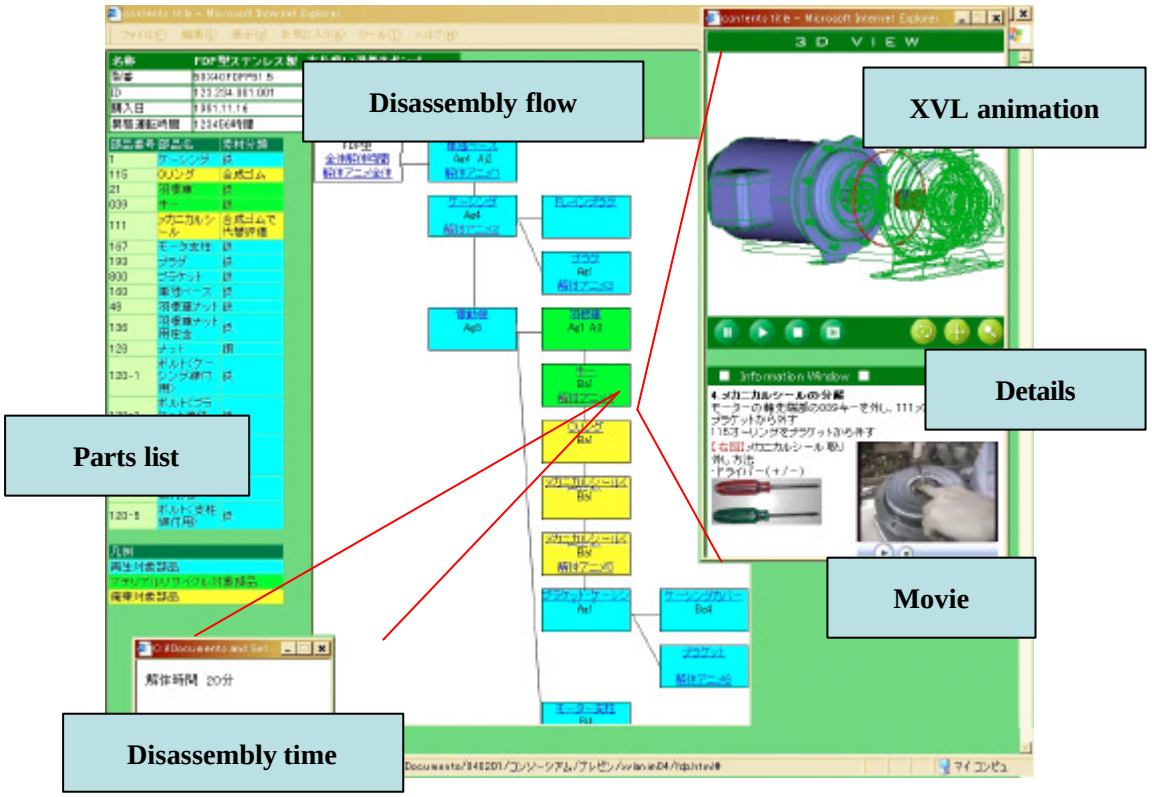


Fig.2.29 Browzer image of 3R information management system

2．5　まとめ

環境配慮設計の重要な要素である易解体性を定量的に評価する手法として，分解性評価指数を開発した．分解性評価指数の活用により，各種工業製品の易解体設計の提案を行うとともに，その高度化を検討した．さらに，分解性評価指数と 3D-CAD データとの連携を考慮した解体支援ソフトウェアを開発した．本章で得られた知見を以下に整理する．

1）分解性評価指数の開発

環境配慮設計において，重要な要素である易解体性に着目した評価手法として，分解評価指数を提案した．本手法は，結合種類，結合点数，部品点数など製品の設計時点で入手可能なデータから製品の解体時間を予測することが可能な指標である．

2）各種工業製品の解体解析

分解性評価指数による各種工業製品を例として分解性評価指数の適用事例を示すとともに，様々な製品に適用可能な易解体設計の提案を行った．また，特殊な構造を有していた家庭用ミシン，手動車いすに関しては，個別に詳細な解析を行った．

a）易解体設計の提案

デスクトップ型 PC 本体，PC モニタ，インクジェット式およびレーザ式プリンタ，テレビ，家庭用ミシン，手動車いす，介護用ベッドの解体試験および分解性評価指数による解体解析を行った．その結果，以下のような製品ごとの構造上の問題点が明らかになった．

- PC モニタ，テレビでは，CRT 結合部の視認性が悪くなっている．
- インクジェット式プリンタではサンプルによってローラ部が圧入されているものがあり，解除困難であった．
- レーザ式プリンタ，家庭用ミシンではネジの本数が非常に多くなっている．
- 手動車いすでは，一結合あたりの結合解除が非常に困難となっており，介護用ベッドでは，製品が大型であるために結合点数が大きくなっている．
- 汎用ポンプでは，電動機の主要部品の解体が困難となっている．
- オフィスシーティングでは，一結合あたりの結合解除が困難な結合方法が多く採用されている．

以上の点を改善することにより，製品の解体性は向上すると考えられる．また，各種の工業製品に共通する易解体設計の指針として以下のような提案を行った．

- 外装部品を結合するネジの視認性を向上させるために，ネジの位置の明示と結合方向の統一化する．
- 主要部品を外側に個別に配置して分離の容易化を図る．
- 基板では少数のネジとはめ込みを併用した結合方法を採用する
- 全体として，ネジの本数の削減，ネジの種類の統一化を図る．

b）家庭用ミシンの解体解析

家庭用ミシンは，電子・事務機器や家電製品とは異なり，結合が解除できない，部品が取り外せないといった根本的な構造上の問題点を有していた．そこで，家庭用ミシンに特化した易解体設計を提案することを目的とした検討を行った．

家庭用ミシンは，以下のような構造上の問題点を有する．

- 家庭用ミシンでは，駆動部品である機構台と軸系部品の連結箇所の手工具による解除が困難である．
- また，ネジ類が多数採用されているだけでなく，締付けトルクが極端に大きく固着していること，コーティングされていることなどにより解除が困難である．
- 家庭用ミシンに採用されている止め輪は，サイズが小さいことに加え，分離できない他の部品が作業の邪魔になるなどの理由により，工具の可動域が極端に狭く，ほとんど解除できなかった．

一方，次のような構造上の特長も有していた．

- 主要部品が外側に個別に配置されている．
- モータやタイミングベルトでは少数のネジとはめ込みを併用した結合方法が採用されている．

以上の点を考慮し，以下のような家庭用ミシンの易解体設計の提案を行った．

- 外観に影響を与えない程度に外装部品に目印を付け，視認性の向上を図ること．
- 家庭用ミシンの結合方法の大半ネジである．そこで，正面カバー側の各部品を結合しているネジの本数を削減すること，ネジを十字穴ネジに統一すること，ネジの上からのコーティングを回避するこ，ネジの色や大きさを変え，結合している部品を明確化すること等のネジ類への配慮が重要である．
- 部品の取り出し方向を正面カバー側に統一し，全ての部品を正面カバー側から取り外せるように配慮すること．
- 軸系の部品や連結箇所の結合方法の簡易化し，全ての部品を分離可能とすること．
- 細かい部品のユニット化を図り，解体プロセスの効率化，単一素材への分離容易性を高めること．

c）車いすの解体解析

今後，普及が予想される福祉用具の中でも市場規模の大きい手動車いすの解体解析を行った．とくに，部品交換などの容易性を考慮しているモジュール型車いすに着目した検討を行った．以下に得られた知見を整理する．

- 車いすは，家電製品や電子・事務機器とは異なり，外装部品がなく，結合箇所が剥き出しでその視認性がよいことから，結合部の探索は容易な構造となっている．
- 車いすは，解除に時間を要するネジ類が多く，一結合あたりの結合解除に要する時間が大きい．
- 使用過程における部品（ユニット）交換を行うことを前提に設計されたフ

ルモジュール型車いすは，解体性に優れている．しかし，本体フレームやフットレストなどユニットの解体には改善の余地がある．

- 車いすの解体性の向上には，従来製品において，新製品であるフルモジュール型に採用されている結合方法を採用し，ユニット分離の容易化を図ること，結合方法を外側からに統一すること，グリップや樹脂部品のように，寿命や素材の異なる部品の分離の容易化を図ることが重要である．
- TPO に応じた形状変更が可能な車いすの概念を提案した．

3）分解性評価指数の高度化

解体データの解析を行い，解体時間を実測することなく，設計段階に入手可能な情報のみで分解性評価指数を算出できるようその高度化を図った．以下のような各指数の決定方法を提案した．

- 結合解除指数は，結合方法と解体時に使用する工具の組み合わせ（30 通り）の中から選定する．
- 結合探索指数は，製品の構造上の特徴により分類されるとの知見から，結合点数，部品点数，製品容積，製品質量を説明変量とする重回帰式より算出するものとした．本研究では，電子・事務機器，大型家電製品等 9 種類の製品群に分けた結合探索指数の算出式を提案した．
- 部品取り出し指数は，部品の平均質量に相関があるとして，重回帰式より求めることとした．結合探索指数のように製品ごとに分類せず，各種工業製品に対して共通の式を割り当てる．

以上の手法を用いて，24 種類の製品を対象に分解性評価指数を算出したところ，実解体時間と相関が見られ，分解性評価指数の有効性を確認した．

4）解体支援ソフトウェアの開発

分解性評価指数と製品の解体フローと 3D アニメーションを連携させ，製品の分解・分別工程の高効率化を支援する解体支援ソフトウェアを開発した．

- 製品の設計段階で入手可能な設計データ（部品名，結合点数，部品点数等）を入力することにより作成することが可能な解体フローを定義した．これにより，製品の解体プロセスを視覚化することが可能となるとともに分解性評価指数による解体解析が容易となった．
- 解体フローと 3D-CAD データとの連携方法について検討し，解体手順をアニメーションにより表現することを可能とした．また，3D-CAD データに関しては，データ容量の圧縮が可能な XVL 方式を採用した．
- その他，解体時間の表示，解体時に使用する工具の表示等の機能を加えたソフトウェアを開発した．本ソフトウェアは，汎用ポンプのみならず様々な製品に応用することが可能である．また，解体支援ツールとしてのみならず，環境配慮設計の支援ツールとしても活用することが可能である．

第 3 章

環境負荷評価手法の開発

第 3 章　環境負荷評価手法の開発

3. 1　目的

前章で示した分解性・解体性の評価は，3R を配慮した設計を考慮する上で，重要な要素である．しかしながら，環境に配慮した製品設計を行うにあたっては，解体性の評価だけではなく，製品のライフサイクル全般を考慮した影響を評価する必要がある．このような考え方を具現化する手法として，ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment，以下，LCA という）手法が注目を集めている．LCA とは，製品やサービスが周辺に与える環境負荷を「ゆりかごから墓場まで」可能限り定量的かつ総合的に評価することを目的とした手法である．LCA に関する研究は，国内外を問わず広範に行われており，ヨーロッパや我が国をはじめとする各国の研究者によって各種の手法が提案されている．第 1 章でも述べたように，オランダの Eco-Indicator[15]，スウェーデンの EPS (Environment Priority Strategies for product design)[17]，スイスの EP (Eco-Point)[16] らが有名であり，早稲田大学永田研究室で開発された統合化指標 ELP (Environmental Load Point)[18), 19)]もこうした手法のひとつである．

しかしながら，従来の LCA 手法は，以下のような問題点を有していることが指摘されている．

- 各種の環境負荷を統合化する際に，主観的な重み付けを必要とするため，客観性に乏しく，評価実施者のバイアスがかかりやすい．
- 評価に必要とされるデータが多岐にわたり，非常に煩雑である．とりわけ，製品等の廃棄後の環境負荷に関するデータや NOx，SOx 等の排出物に関するデータ等，企画・設計段階における入手が困難な情報が要求される場合が多く，企画・開発を支援するツールとしては利便性が低い．
- 製品やサービスのマイナスの側面である環境負荷を評価する手法にとどまっており，企画・設計者のみならず，製品やサービスを選択する消費者にとってのインセンティブになりにくい．

したがって，循環型経済社会に向けた製品・サービス等を実現していくためには，従来の LCA の問題点を補いうるような，消費者の意思を反映させた企画･設計者のための標準性，利便性を備えた意思決定支援ツールが必要である．

本章で述べる環境効用ポテンシャル評価手法（Eco-Efficiency Potential Assessment Method，以下，E2-PA）は，以上のような問題点を解決することを目的に開発した製品･サービス等の環境負荷の定量的評価手法である．

E2-PA の開発のねらいは，以下のとおりである．

① 手法の合理性を理解した上で簡便に使用できること．
② 設計者・企画者等が環境配慮型の製品やサービスを提供するに当ってのインセンティブになるとともに，使用者・消費者が選択するに当っての判断資料となること．
③ 製品やサービス等の総体とした環境負荷をライフサイクル全体にわたって評価できること．
④ 資源やエネルギーの消費を含め，各種の環境負荷を資源強度として統合

化できること.

以上のねらいから，E2-PA では以下の考えを導入している.

① 製品やサービス等に起因する環境負荷を設計・企画時点で評価できるよう「ポテンシャル」の概念を取り入れること.

② 従来の LCA の「機能単位」を消費者の視点から「効用」として把握し直し，評価すること.

③ 統合した資源強度以外に，評価結果を経済性等目的に応じたさまざまな表現に変換できるようにすること.

本章では，E2-PA の考え方の詳細を述べるとともに，製品を例とした評価事例を示すこととする.

3. 2　基本概念

E2-PA は，ポテンシャル評価と拡張した環境効率という 2 つの概念をその基礎においている．製品，サービスを評価するにあたり，資源，エネルギーの投入に関するデータに加え，LCA では NO_X，SO_X 等の排出に関するデータも必要で，こうしたデータは製品の設計の段階で正確に把握することは困難であり，LCA の実施が難しいとされる一因となっていた．そこで，本手法においては，設計者にとっての利便性を実現するために,製品が与えうる環境への負荷を「ポテンシャル」として捉え，設計段階で把握可能なデータのみを用いて評価を実施することにした．ポテンシャルとは，投入された資源や設計時に設定された要素から，それぞれの環境負荷の上限を求める考え方である．一方，拡張した環境効率の概念とは，WBSC(World Business Council for Sustainable Development：世界環境経済人協議会)が提言した 7 つの要素に加え，有害物質の使用量の削減と廃棄物の減少を付け加えたものである（Fig.3.1).

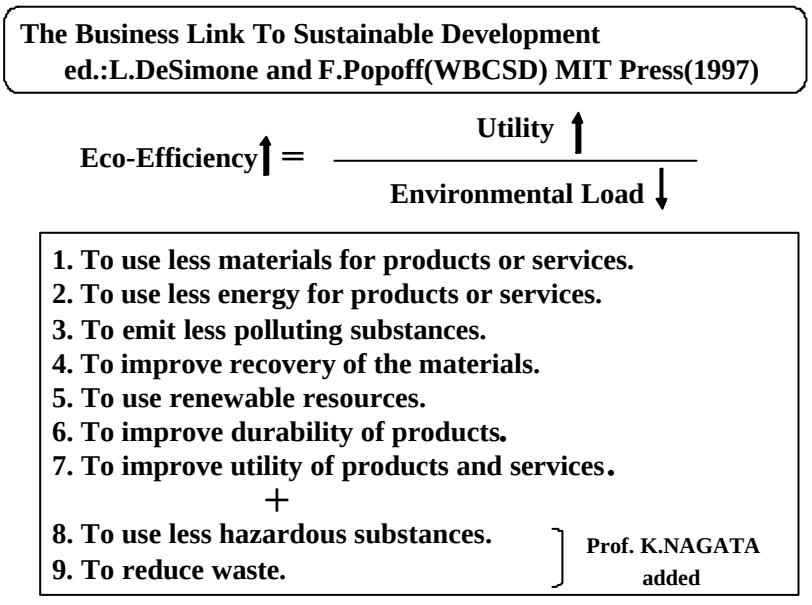


Fig.3.1 Expansion of Eco-Efficiency

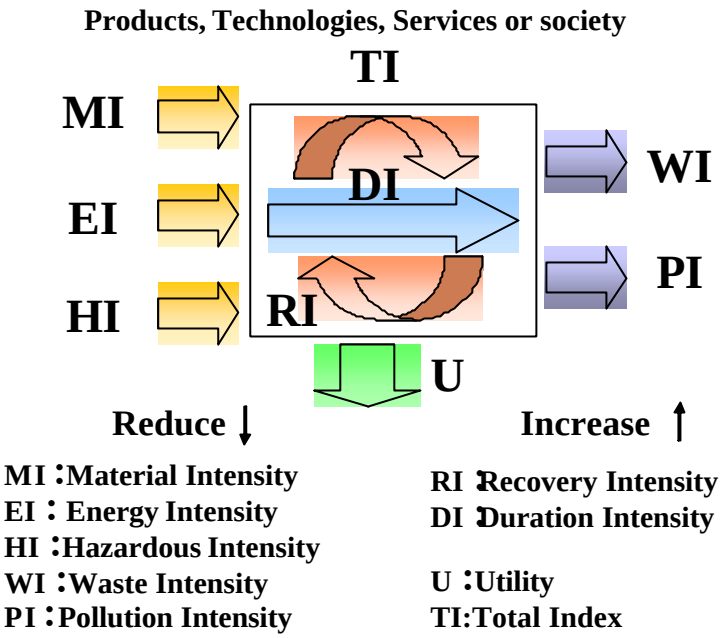


Fig.3.2 Elements of E2-PA

3．3　E2-PA の構成要素と各資源強度の定義

E2-PA の構成要素を Fig.3.2 に示す．ここで，MI，EI，HI はそれぞれ材料，エネルギー，有害物質の使用に伴う資源の環境負荷を表している．WI は廃棄物，PI は大気汚染物質や水質汚濁物質の発生について，RI は再資源化性（使用済み製品や部品のリユース，材料リサイクル，エネルギー回収等），DI は製品の長期使用性，U は効用を表す．Table 3.1 には，各資源強度の評価対象となる環境負荷を示す．また，同表では，製品評価を例にターゲットとなるライフサイクルの段階を示している．これにより，ライフサイクル全体にわたっての環境負荷を把握することが可能となる．

E2-PA では，ポテンシャル評価の概念から，基本的には入口側の要素による評価で全体の傾向を把握するので，出口側の要素である PI，WI は省略することを基本とする．また，DI は，製品の長期使用性と省資源化の両立を評価するときのみに用いる指標である．したがって，入口側の要素 MI，EI，RI，HI を評価に用いて，製品全体の環境パフォーマンスを示す統合指標 TI を求めることができる．すなわち，

$$TI = \frac{U}{MI + EI + HI - RI} \tag{3.1}$$

また，環境負荷を統合化する際には，資源の希少性，有害性，効率性等を考慮して重み付けを行う必要がある．E2-PA では，いくつかの重み付けのバリエーションを有しているが，基本的には，Table 3.2 に示す可採年数 [56]（あるいは擬似可採年数）による重み付けを行うことを基本としている．

Table 3.1 The target of respective intensity and their lifecycle stage which they are considered on the products' assessment

Assessment	Intensity	Target Environmental Load	Target Stage on Products' Assessment		
			Production	Use	waste
Reduce ↓	MI	Material	?	?	
Reduce ↓	EI	Energy	?	?	
Reduce ↓	HI	Hazardous substance	?	?	
Reduce ↓	WI	Waste		?	?
Reduce ↓	PI	Pollution	?	?	?
Increase ↑	RI	The effectiveness of recovery		?	?
Increase ↑	DI	Duration		?	

Table 3.2 The Principal Resources' R/P (Basic Weighting Factor on E2-PA) [51)]

Resources	R/P　y
Crude	44.4
Coil	139.9
Natural	62.7
Uranium	93.4
Iron	273.7
Copper	51.2
Aluminum	247.2

3．4　各資源強度の算出方法

MI，EI，HI，RI に関して具体的な算出方法を述べる．効用 U に関しては，次節で詳述する．

3．4．1　資源強度換算原単位の算出

E2-PA では，各物質，エネルギー等の環境負荷の単位投入量あたりの資源強度を「資源強度換算原単位」と称している．資源強度換算原単位は，エネルギーや素材などの投入量をそれぞれについて Table 4.2 に示す可採年数によって重み付けを行い，その総和をとることによって得られる．すなわち，ある物質 *x* の資源強度換算原単位を例にとると，その算出式は，次のように表現できる．

$$mi_x = \sum_i \left(\frac{m_{Mi}}{y_i}\right) + \sum_j \left(\frac{m_{Ej}}{y_j}\right) \tag{3.2}$$

ここで，mi_x：物質 *x* の資源強度換算原単位[kg/y/kg]
m_{Mi}：物質 *x* を 1kg 製造するのに必要な物質 *i* の投入量[kg/kg]
y_i：物質 *i* の可採年数（あるいは擬似可採年数）[y]
m_{Ej}：物質 *x* を 1kg 製造するのに必要なエネルギー *j* の投入量[kg/kg]
y_j：エネルギー *j* の可採年数[y]

あるエネルギー資源 *z* のエネルギー資源強度換算原単位を ei_z とすると，これ

も同様の方法で算出できる.

資源強度換算原単位の算出には，統計データ [57)~62)]や LCI（ライフサイクルインベントリー）などに関する各種業界団体による報告書など [63)~66)]を用いた．こうした原単位を整備することにより，物質やエネルギー等の投入量のみを乗じることによって資源強度を得ることが可能となっている.

Table 4.3 に主要な資源の資源強度換算原単位を示す．金属類に関しては，新規製造材とリサイクル材それぞれから製造した場合の原単位を算出している.

3．4．2　物質資源強度 (MI: Material Intensity)

MI は，鉄，アルミ，銅，プラスチックなどの物質資源に起因する資源強度である.各物質の投入量に資源強度換算原単位を乗じることで容易に算出できる．すなわち,

$$MI = \sum_{x}(m_{Mx} \times mi_{x}) \qquad (3.3)$$

ここで，MI：物質資源強度[kg/y]

m_{Mx}：物質 x の投入量[kg]

mi_{x}：物質 x の資源強度換算原単位[kg/y/kg]

Table 3.3 Unit Material and Energy Intensit

Unit Intensity	Materials		Unit Intensity kg/y/kg (kg/y/kWh)
Material mi_x	Pig Iron Casting	New	5.993E-03
		Recycled	3.996E-03
	Steal	New	1.369E-02
		Recycled	4.191E-03
	Aluminum	New	3.566E-02
		Recycled	1.785E-02
	Copper	New	2.440E-02
		Recycled	4.867E-03
	PET (polyethylene terephthalate)		2.197E-02
	PA (Polyamide, Nylon)		6.006E-02
	Synthetic rubber		2.525E-02
Energy ei_y	Electricity*		1.544E-03
	Crude		2.252E-02
	Natural Gas		1.595E-02
	Coal		7.148E-03
* Electricity's unit is "kg/y/kWh".			

3．4．3　エネルギー資源強度 (EI: Energy Intensity)

EI は，重油，軽油や電力などエネルギー資源に起因する資源強度である．EI は，MI と同様，その投入量を知ることで容易に算出される.

$$EI = \sum_{y}(m_{Ey} \times ei_{y}) \qquad (3.4)$$

ここで，EI：エネルギー資源強度[kg/y]

m_{Ey}：エネルギー y の投入量[kg]

ei_y：エネルギーyの資源強度換算原単位[kg/y/kg]

なお，上式では，エネルギーの投入量を kg としているが，これに関しては，エネルギーの種類に応じて，適宜対応させればよい．例えば，Table 3.3 に示したように電力に関しては，1kWh あたりの資源強度を原単位として求めている．したがって，消費電力量を得ることにより，容易に資源強度を得ることができる．

3．4．4　有害物質資源強度 (HI: Hazardous Intensity)

HI は，有害物質の使用に起因する環境負荷を表す資源強度である．HI の算出にあたっては，ポテンシャル評価の特徴が最もよく現れる．すなわち，E2-PA では，評価対象の有害物質をリサイクル等によって無害化するのに必要な物質，エネルギーの投入による資源強度の総和を HI として評価する．すなわち，HI の基本式は，次式のようになる．

$$HI = \sum_z (m_{Hz} \times hi_z) \tag{3.5}$$

ここで，HI：有害物質資源強度[kg/y]

m_{Hz}：有害物質 z の投入量[kg]

hi_z：有害物質 z の資源強度換算原単位[kg/y/kg]

HI を算出するためには，hi_z を知る必要がある．しかしながら，実際には，無害化プロセスが確立されていない物質や無害化の基準が曖昧である物質が数多く存在する．そこで，本手法では，広範な物質の環境負荷を評価可能とするために，hi_z を算出する代替方法を提案している．以下に，①新規製造材生産に要する資源強度による代替（以下，方法 1 という）②基準物質に対する重み付けによる代替（以下，方法 2 という）の 2 つの考え方について述べる．

（1）新規製造材生産に要する資源強度による代替（方法 1）

方法 1 は，有害物質のうち重金属類について，当該物質を含有する鉱石の製錬に要する全消費エネルギーをもって無害化（リサイクル）プロセスの想定最大値として代替するものである．これは，いわゆる「都市鉱山」という考え方（金属類においては，天然の鉱脈中の濃度よりも廃棄物中の濃度が高い場合が多いので，新規製造材生産よりも廃棄物からのリサイクルの方が，消費エネルギーは小さくなり経済的であるという考え）を踏まえて，廃棄物からの重金属を取り出して無害化処理（リサイクル）するためのエネルギーを新規製造材生産における資源強度を上限値として代替するものである．このとき，新規製造材生産における資源強度は，物質資源強度として代替できるので，この場合の有害物質資源強度換算原単位を hi_1 は，次式より得られる．

$$hi_1 = \frac{mi_x}{(C_h / C_m)} \tag{3.6}$$

ここで，hi_1：方法 1 による有害物質の資源強度換算原単位[kg/y/kg]

mi_x：主生産物の物質資源強度換算原単位[kg/y/kg]

C_h：鉱石中の当該物質濃度[%]
C_m：鉱石中の主生産物濃度[%]

この方法で代替できる有害物質は主に副産物として製錬されている重金属類で，その主生産物との関係を Table 3.4 に示す．本手法では，有害物質の主生産物の鉱石中の濃度が必要になるため,鉱石の組成データが必要になる.しかし，そのようなデータの収集例がなく把握が困難である．そこで，副産物と主生産物の埋蔵量の比[67]を鉱石中の濃度と仮定した.

本手法は，有害物質の無害化に要する資源強度をポテンシャルとして評価するという HI の定義には適しているが，評価対象となる物質が限定され，評価範囲の拡張性に乏しいという欠点がある.

Table 3.4 Hazardous Substances and their main Products

Hazardous Substance	Symbol of a Chemical Element	Main Product
Lead	Pb	Copper
Arsenic	As	Copper
Cadmium	Cd	Zinc
Chrome	Cr	Iron
Selenium	Se	Copper

（2）基準物質に対する重み付けによる代替（方法 2）

方法 2 では，無害化処理プロセスが明らかとなっている物質等を基準物質とみなし，その物質に対する有害性の係数を基準物質の資源強度換算原単位に乗じることによって原単位を得る．この場合の有害物質の資源強度換算原単位を hi_2 とすると，次式のように表現される.

$$hi_2 = hi_S \times P_S \qquad (3.6)$$

ここで，hi_2：方法 2 による有害物質の資源強度換算原単位[kg/y/kg]
hi_S：基準物質の資源強度換算原単位[kg/y/kg]
P_S：基準物質に対する有害物質係数

有害物質に関する基準やガイドライン[67]は，幅広く規定されているため，多様な物質に関する評価が可能である点が本手法の利点である．しかし，その一方で，基準物質の選定の仕方によっては，大きく値が変動してしまう可能性がある.

（3）有害物質資源強度換算原単位 hi_z の決定

以上のように 2 つの代替案を提案したが,両者とも一長一短である.そこで，本研究では，方法 1 と 2 の利点を組み合わせることにより，双方の短所を補うような形で hi_z を整理することを試みた.

まず，広範な物質に対して評価が可能であるという利点を優先し，方法 2 の考え方を基本とした．その際，基準物質を鉛（Pb）と設定し，その資源強度換算原単位 hi_s を方法 1 の考え方に基づき算出した．この理由としては，鉛が有害物質として広く認知されていることに加え，その製錬に要するエネルギーが統計データ[61]により明確に示されていることが挙げられる.

また，有害物質係数 P_S は，我が国の環境基準における鉛の基準値に対する比として決定した（鉛の P_S が 1）．複数の基準に渡って規制がされている物質に関しては，ポテンシャル評価の考え方から，P_S が最大となる値を採用することとした．

Fig.4.3 は，以上のような考え方に基づき，決定した hi_z と，P_S を代表的な国際基準とした場合に算出した際の資源強度換算原単位を主な有害物質について算出し，比較した結果である．国際基準としては，WHO (World Health Organization, 世界保健機関)のガイドラインと EPA (Environmental Protection Agency, 米国環境保護庁)による基準値を採用した[63]．まず，同図からもわかるように，有害性の傾向に関しては，いずれの値も同様な傾向を示していといえる．その中で，本研究において決定した hi_z は，ホウ素（B）を除けば，いずれの物質においても最大となっていることがわかる．

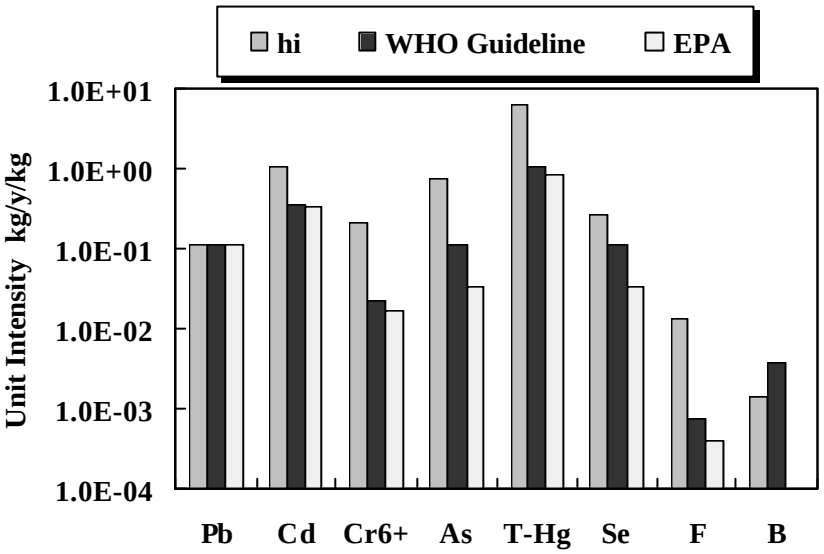


Fig.3.3 Comparison between hi and Intensity Calculated by Environmental Standard Abroad

3．4．5　再生資源強度 (RI: Recovery Intensity)

RI は，使用済みとなった製品等のリユースやリサイクルによって，回収あるいは節約される資源強度と，その再生プロセスに投入される資源強度の収支として評価する．すなわち，RI は，リユースやリサイクルによる資源の節約効果を表す資源強度であり，大きいほど良好ということになる．RI の基本式を以下に示す．

$$RI = I_R \times d - I_w \qquad (3.7)$$

ここで，RI：再生資源強度[kg/y]
I_R：再生対象物の資源強度[kg/y]
d：新規製造資源に対する価値の維持率
I_W：再生プロセスの投入資源強度[kg/y]

E2-PA では，様々なリサイクル方法を体系化し，評価式を作成しているが，ここでは，マテリアルリサイクル再生資源強度 RI_{mr} と部品リユース再生資源強度 RI_{uc} の算出式を代表例として示す.

（1）マテリアルリサイクル再生資源強度 RI_{mr}

RI_{mr} は，使用済みの材料を再び同種の材料にリサイクルすることで節約される資源強度について評価する．以下に，その算出式を示す.

$$RI_{mr} = MI_{mr\_p} \times d_{mr} - I_{mr\_w}$$
$$d_{mr} = t_{mr} \times p_{mr} \quad (3.8)$$

ここで，RI_{mr}：マテリアルリサイクル資源強度[kg/y]

MI_{mr_p}：マテリアルリサイクル対象となる物質の新規製造時（新規製造材）の物質資源強度[kg/y]

I_{mr_w}：マテリアルリサイクル工程の投入資源強度[kg/y]

d_{mr}：リサイクル材料の新規製造材料に対する価値の維持率

t_{mr}：材料活用期間率

（リサイクル材料の用途における活用期間と新規製造材料の活用期間の比率；リサイクル材料活用期間/設計耐用期間）

p_{mr}：物性維持率

（リサイクル材料と新規製造材料の物性比率；リサイクル材物性/新規製造材料物性）

マテリアルリサイクルにおいては，材料劣化による物性低下が発生することがあるため，これを物性維持率 p_{mr} として導入し，評価に含めた．また，元来の用途と異なる用途に利用する場合,活用期間が異なることも考えられるため，これを活用期間率 t_{mr} として導入した.

RI_{mr} は，Table 4.3 に示した物質資源の資源強度換算原単位 mi_x を用いることによって，単位質量あたりで表現することができる．これを ri_{mrx} とすると,

$$ri_{mrx} = mi_{xV} \times t_{mrx} \times p_{mrx} - mi_{xR} \quad (3.9)$$

ここで，ri_{mrx}：物質 x のマテリアルリサイクル再生資源強度換算原単位 [kg/y/kg]

mi_{xV}：物質 x の資源強度換算原単位（新規製造材）[kg/y/kg]

t_{mrx}：物質 x の活用期間率

p_{mrx}：物質 x の物性維持率

mi_{xR}：物質 x の資源強度換算原単位（リサイクル材）[kg/y/kg]

マテリアルリサイクルに要する資源強度は，リサイクル材の製造時の資源強度mi_{xR} として評価できることから上式は導出される.

Table 4.5 に主要な物質のマテリアルリサイクル再生資源強度換算原単位 ri_{mrx} を，活用期間率 t_{mrx}，物性維持率 p_{mrx}，などの各パラメータと併せて示した．t_{mrx} に関しては，対応するデータが得られなかったため，ここでは全て 1 としている．p_{mrx} は，文献値等に基づき設定している．鋼材に関しては，リサイクル材の新規製造材に対する引張強度の比が 0.6 であったことから，これを物性維持

率とした．アルミニウムに関しては，我が国におけるアルミ缶の Can to Can リサイクルにおけるリサイクル材の混入率が 60.3%であることから，これをアルミニウムの品質を確保するための限界混入率とみなし，リサイクル材の物性維持率として代用した．鋳鉄及び銅については，該当するデータが得られなかったため，リサイクル材が新規製造材と同等の品質に回復すると仮定し，物性維持率を 1 とした．

Table 3.5 Unit Recovery Intensity for material recycle (ri_{mrx})

Subject	Unit Material Intensity (Vergin) mi_{xV}	Term Ratio t_{mrx}	Deterioration Ratio p_{mrx}	Unit Material Intensity (Recycled) mi_{xR}	Unit Recovery Intensity ri_{mrx}
Unit	kg/y/kg	-	-	kg/y/kg	kg/y/kg
Pig Iron Casting	5.993E-03	1	1	3.996E-03	1.997E-03
Steal	1.369E-02	1	0.60 *1	4.191E-03	4.023E-03
Aluminum	3.566E-02	1	0.603 *2	1.785E-02	3.654E-03
Copper	2.440E-02	1	1	4.867E-03	1.953E-02

*1　The tensile strength ratio of virgin steal to scrap (Only Virgin: 250MPa, Only Scrap: 150MPa (Tochigi Prefecture Industrial Technology Center in 2001).
*2　The percentage of recycled materials used on “Can to Can” recycle is 60.3% (Aluminum Can Recycling Association, JAPAN).

（2）部品リユース資源強度（RI_{uc}）

RI_{uc} は，使用済みとなった部品を部品として再使用することで節約される資源強度である．リユースした分だけ，新品の製造に相当する資源強度が節約されることとなる．以下に，その算出式を示す．

$$RI_{uc} = (MI_{uc\_p} + EI_{uc\_p}) \times d_{uc} - I_{uc\_w}$$
$$d_{uc} = t_{uc} \times p_{uc} \times c_{uc} \qquad (3.10)$$

ここで，RI_{uc}：部品リユース資源強度[kg/y]
MI_{uc_p}：リユース対象となる部品の新規製造時の物質資源強度[kg/y]
EI_{uc_p}：リユース対象となる部品の新規製造時のエネルギー資源強度[kg/y]
I_{uc_w}：部品リユース（再生）工程の投入資源強度[kg/y]
d_{uc}：リユース部品の新品部品に対する価値の維持率
t_{uc}：リユース部品期間率
（リユース部品における活用期間と新品部品の活用期間の比率，リユース部品活用期間の期待値/設計耐用期間）
p_{uc}：性能維持率
c_{uc}：リユース可能部品回収率
（リユース部品として回収される確率の期待値）

部品リユースにおいては，回収部品は必ずしも設計時点での性能を維持できるとは限らないことから，性能維持率 p_{uc} をパラメータとして導入した．また，製品がユーザーから放出された後に，リユース対象となる部品がどれだけの活

用期間を有しているかを評価するために，その期待値と設計耐用年数の比率をリユース部品期間率 t_{uc} として考慮している．

さらに，メーカー側による製品・部品評価を想定した場合，使用後に部品リユースができるかどうかは確率で表現せざるを得ないことから，これをリユース可能部品回収率 c_{uc} として評価に含めることにした．

3．5　E2-PA における効用の評価

3．5．1　効用を評価する目的

E2-PA では，環境効率，ポテンシャル評価という概念から出発することにより，製品設計支援ツールとしての LCA が抱えていた課題を克服している．E2-PA では，製品の環境負荷だけではなく，消費者がその製品に期待する本質的な要素である「効用」を評価に含めている．製品の環境負荷だけを評価する考え方では，製品のマイナス面の評価しかできず，結局は何も作らないことが最良という結論が出てしまう．製品のプラスの側面である効用を定量的に評価し，環境負荷と合わせて統合評価とすることが E2-PA の目的でもある．

E2-PA と従来の LCA 手法との相違点は消費者の視点での効用を導入した点である．Fig.3.4 は，E2-PA の効用と LCA との相違を示している．テレビを例にとると，従来の LCA ではブラウン管，液晶，プラズマで技術を区別し，また，機能単位を画面サイズとして評価しており，製品のある一面を切り取った評価しかできず，製品のプラスの側面である適応技術の違いを評価することができない．一方，E2-PA では，消費者からの視点で，画面サイズだけでなく消費電力，全体積，BS 対応などの機能を効用の要素として評価する．これによって，従来の LCA では成し得なかった画面サイズの違う，適応技術の異なる製品も幅広く評価することが可能である．

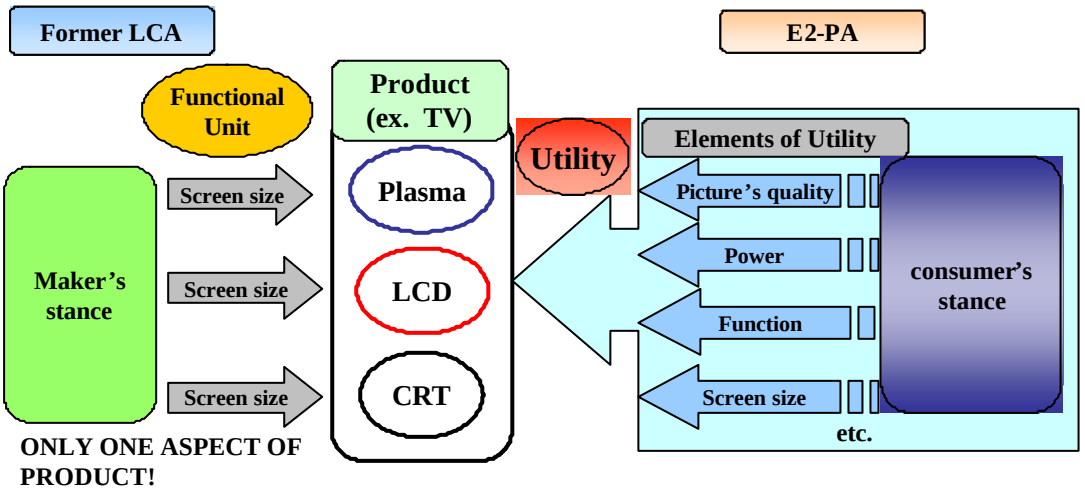


Fig.3.4 Difference between former LCA's functional unit and E2-PA's Utility

3．5．2　効用の考え方と評価方法

ある製品に対し，その価格が適正であると消費者が認めているとすると，「製品の市場価格は製品の効用を現しているのではないのか」という考え方が基本

となっている．価格が決まる要素は，定量化が可能な性能を表す要素からブランド力など定量化できない要素まで多岐に渡ることが予想されるが，現時点では，定量化可能な性能を現す要素のみを抽出し，効用として評価する．

実際には，製品の市場価格を調査し，その価格を目的変量とし，その価格に影響を及ぼしている効用の要素を説明変量とし重回帰分析を行う．それによって，導出された重回帰式で計算できる予測価格を製品の効用と定義する．したがって，効用の単位は「円」となる．E2-PA における効用を一般化すると次のように表現できる．

$$U = A_1 \times u_1 + A_2 \times u_2 + \cdots + A_n \times u_n + B \qquad (3.11)$$

ここで，U：効用[円]

$A_1,\ldots,A_n$：回帰係数

$u_1,\ldots,u_n$：効用の要素

B：定数

3．5．3　効用の評価事例

（1）実際価格と効用の関係

デスクトップ型パソコンを例に，効用の評価事例を示す．市場価格をインターネット上で調査し，効用の要素と考えられる項目を抽出して，得られたデスクトップ型の重回帰式を以下に示す．詳細な説明は，なお，説明変量の選定にあたっては，逐次法[46]による検定を行っている．

$$U_{DPC} = 3.6E+01 \times u_1 + 4.5E-01 \times u_2 + 1.3E+02 \times u_3 + 1.0E+04 \times u_4 + 1.0 \times u_5 - 1.6E+05 \qquad (3.12)$$

ここで，U_{DPC}：デスクトップ型 PC の効用[円]

u_1：CPU 周波数[MHz]，u_2：HDD 容量[MB]，u_3：メモリ容量[MB]

u_4：モニタサイズ[inch]，u_5：メディア容量[MB]

市場価格と効用の関係をプ Fig.4.5 を示す．多少のばらつきがあるものの，相関関係が確認できる．このように，複数の要素を定量化し，ひとつの指標として統合化できる点が本手法の特徴である．

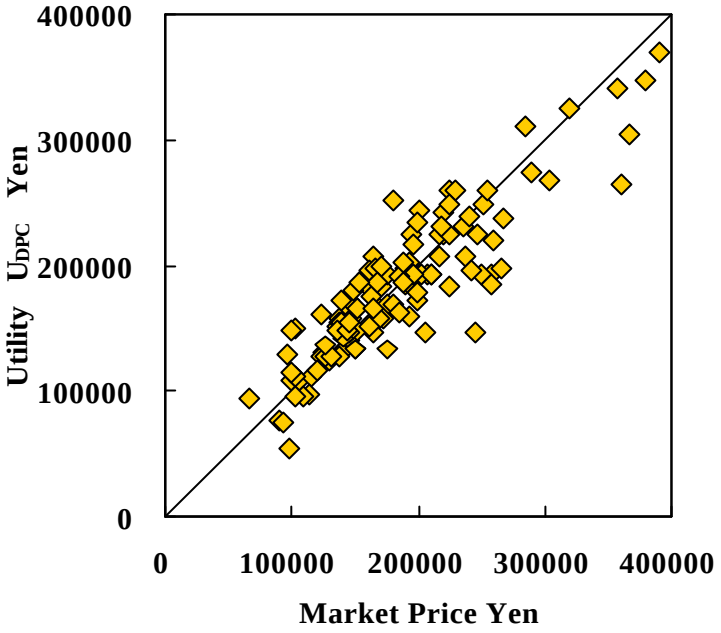


Fig.3.5 Comparison between Market Price and Desktop PC's Utility

（2）効用の要素の分析

効用は，製品の「プラスの側面」を評価しているため，新製品開発の指針となりうる可能性を有している．その検討を行った例をデスクトップ型パソコンを例に示す．Table 3.6 では，2002 年度と 2003 年度に発売された製品ついて各効用の要素の平均値を算出した結果である．2002 年度の製品を 1 として，相対化した結果を Fig.3.6 に示す．2003 年度発売の効用は 1.23 倍になっており，また，効用の各要素もモニタサイズを除けば，それぞれ増加していることが確認できる．

これらの要素が，今後どのような方針で変化していくことが望ましいのかを検討することを目的に感度解析を行った．2003 年度の製品をベースにと Table 4.7 の条件に従って効用の要素を変化させた「新型デスクトップ型 PC」を想定し，その効用を比較する．ここでは，全効用の要素をそれぞれ 10%～30%増加させたもの（CASE1～3）と，各 1 要素のみを 50%増加させたものを想定している（CASE4～8）．Fig.3.7 に想定製品における効用の変化を示す．全効用の要素を万遍なく増加させた製品の方が，各 1 要素を増加させた製品よりも効用が大きいことがわかる．この結果より，1 つの効用の要素を高めるだけでは，より高い効用を有する製品にならないことがわかる．また，モニタサイズを 50%大きくしたときに効用が大幅に増加しているが，これは，パソコンを単なる OA 機器ではなく，テレビや DVD プレーヤーなどの AV 機器とみなすと，消費者が求める「効用」に合致すると予想される．このことから，パソコンの効用を高めるには，効用の各要素を向上し，また，多目的利用を可能とする大型モニタを備えた製品として開発していくことが，望ましい方向性であるというひとつの指針が提案できる．

Table 3.6 Comparison of Desktop PC's Utility (2002 Models and 2001 ones)

Item		Sample Number	Average					
			Utility	CPU	HDD	Memory	Monitor	Media
				u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
Unit		number	Yen	MH z	MB	MB	inch	MB
Year	2002	93	147477	1647	93226	263	16	8968
	2003	130	181878	1998	113462	296	16	17099

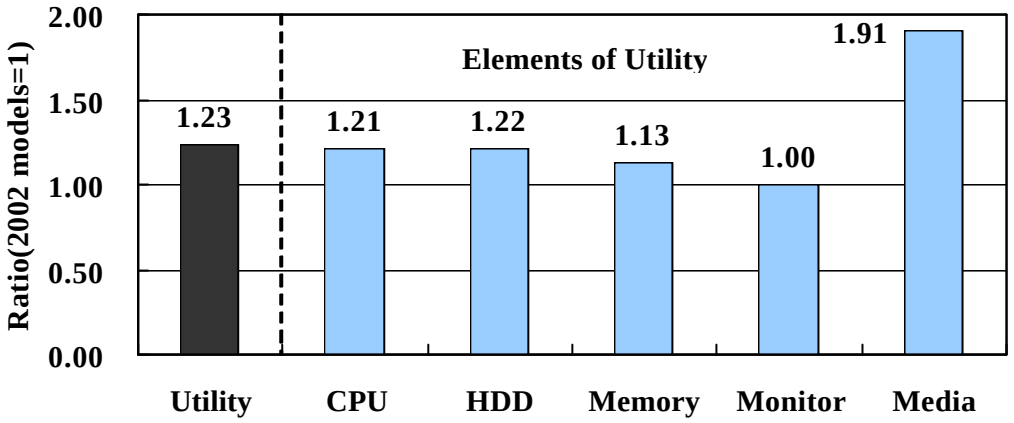


Fig.3.6 The ratio of average Utility and its elements of 2003 models to 2002 ones

Table 3.7 Estimated conditions of "New" Desktop PC

Item	Year		CASE							
No.	'02	'03	1	2	3	4	5	6	7	8
Estimated Conditions	-	-	All 10% UP	All 20% UP	All 30% UP	CPU 50% UP	HDD 50% UP	Memory 50% UP	Monitor 50% UP	Media 50% UP

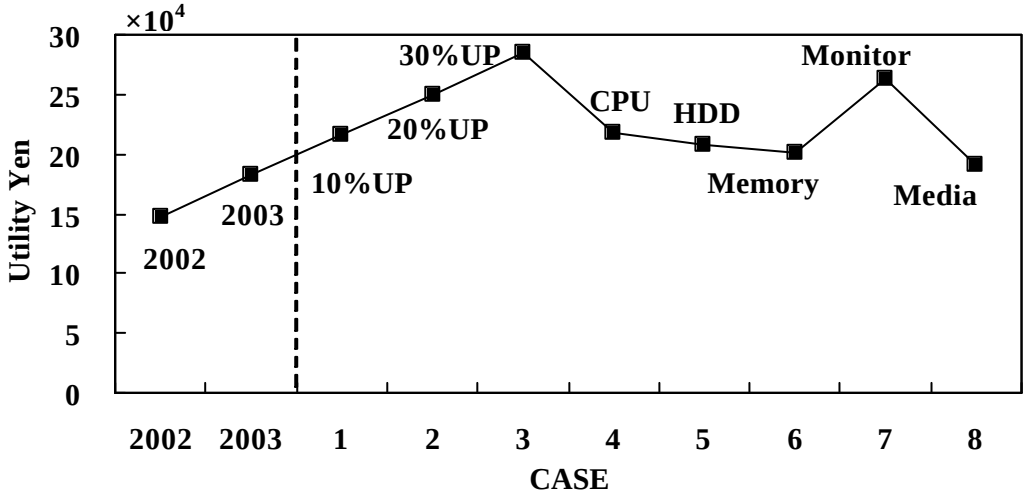


Fig.3.7 The change of Utility on each CASE

3．6　E2-PA による統合評価

ノート型パソコンを例に，効用と資源強度とによる統合指標 TI による統合評価事例を示す．テレビやデスクトップ型パソコンと同様の手法で導出したノート型パソコンの効用の算出式は，以下のようになる．

$$U_{NPC} = 8.3E-01\times u_1 + 9.4E+01\times u_2 + 1.9E-03\times u_3 + 7.7E+01\times u_4 + 5.9E+01\times u_5 + 5.8\times u_6 - 2.0E+04 \quad (3.13)$$

ここで，U_{NPC}：ノート型 PC の効用[円]

u_1：HDD 容量[MHz]，u_2：メモリ容量[MB]，u_3：全体積[mm^3]

u_4：解像度，u_5：キャッシュメモリ[MB]，u_6：LAN[BASE‐TX]

評価対象製品の使用条件と効用の要素を Table 3.8 に示した．

Table 3.8　Specification of the Notebook personal computer and usage condition

Usage condition	HDD	Memory	Volume	Resolving power	Cache memory	LAN
h	MB	MB	mm^3	—	MB	BASE
Use 4.5、Stand by4.5	20000	128	4.05E+06	1024	256	100

一方，資源強度を算出する際に用いるインベントリデータは，環境ラベルタイプⅢに従って公開されているデータを用いた[23)]．公開データでは，製品の素材製造，組立，物流，使用，廃棄と全ライフサイクルに渡って開示されているが，ここでは，物流は評価範囲に含めなことを条件とする．

本評価では，Table 3.8 に示す製品を「標準製品」とし，Table 3.9 に示す想定条件下で各資源強度と効用を変化させたときの統合指標 TI の比較評価を行う．なお，CASE1 は，廃棄段階における使用済み製品の回収率を 100%（標準製品では，使用済み製品の回収率を 20%としている．CASE2 は，使用時のエネルギーを 50%削減した製品を想定している．CASE3，4，5 は，効用の各要素をそれぞれ，10%，20%，30%向上させたものである．

各 CASE の資源強度と効用を算出した結果を Fig.3.8(a)に示し，統合指標 TI を算出した結果を同図(b)に示す．なお，統合指標 TI は，次式によって算出される．

$$TI = \frac{U_{NPC}}{MI_{\_p} + EI_{\_p} + HI_{\_p} + MI_{\_u} + EI_{\_u} - RI_{\_w}} \quad (3.14)$$

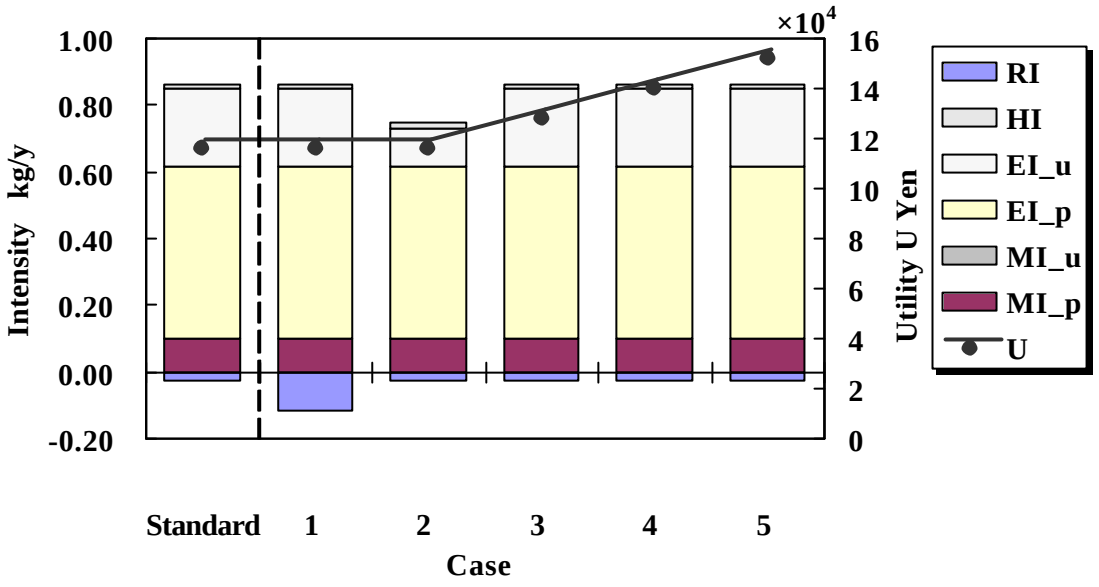
資源強度では，使用エネルギーを 50%削減した CASE2 で大きく資源強度が低減していることがわかる．TI の評価では，回収率を上げた CASE1 や，使用時のエネルギーを削減した CASE2 よりも，効用を高めた CASE4，5 の TI が向上していることがわかる．

以上のように，E2-PA を適用することによって，環境負荷削減効果のみなら

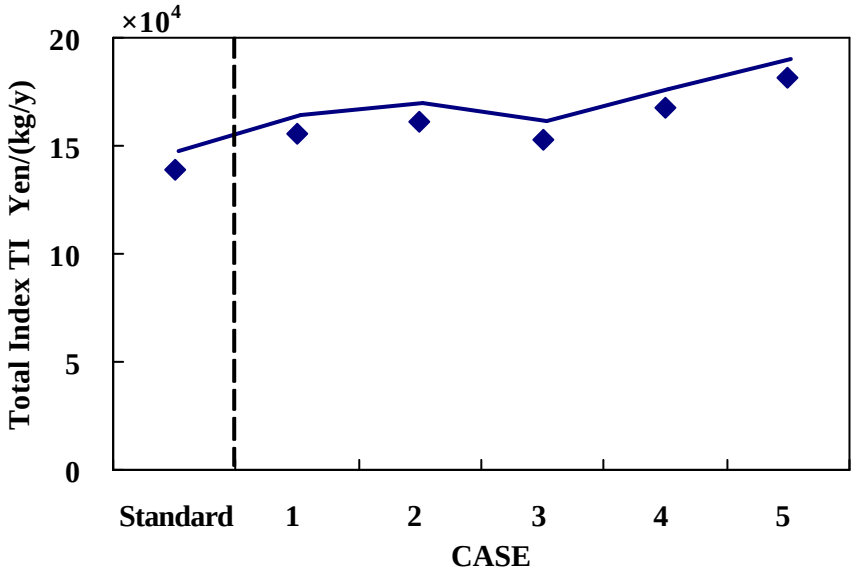
ず，効用の向上という観点からも製品評価が可能であることを示した.

Table 3.9　Conditions for notebook PC assessment by E2-PA

Conditions		Recovery rate of used procuts	Reduction rate of energy consumption	Up-grading rate of Utility elements (all)
CASE	Standard	20%	0%	0%
	1	100%	0%	0%
	2	0%	50%	0%
	3	0%	0%	10%
	4	0%	0%	20%
	5	0%	0%	30%



(a) Intensity and Utility



(b) Total Index (TI)

Fig.3.8 Results of notebook PC assement by E2-PA

3．7　まとめ

従来の LCA 手法の問題点を改善し，利便性の向上を図った環境負荷評価手法，環境効用ポテンシャル評価手法（Eco-Efficiency Potential Assessment Method, E2-PA）を開発した．

1）基本概念

E2－PA では，①環境効率，②ポテンシャル評価の 2 つの概念をその基礎においている．

- 環境効率に関しては，WBCSD で提唱された 7 つの要素に，評価対象として有害物質の使用量の削減と廃棄物の減少を付け加え，更新性物質の持続的使用を使用材料とエネルギーの削減のなかで評価することとしている．E2－PA は，環境への影響を減少しつつ人々のニーズに答え，かつ生活の質を向上できるような製品やサービス等を提供するための手法と定義できる．
- ポテンシャル評価は，従来の LCA の煩雑性を排除し，評価の利便性を実現するために導入した考え方である．製品が与え得る環境への負荷を「ポテンシャル」として捉えることによって，設計・企画段階で把握可能なデータのみを用いて評価可能としている．ポテンシャルとは，投入された資源や設計時に設定された要素から，それぞれの環境負荷の上限値を求める考え方である．

2）E2-PA の構成要素と資源強度の定義

E2－PA では，環境負荷を資源強度という形で統合化を図る．

- 物質，エネルギーの環境負荷は，可採年数（Reverse/Product，R/P）による重み付けを行うことを基本としている（MI，EI）．
- リサイクル性は，使用済みとなった製品等から各種のリサイクルによって回収あるいは節約される資源強度と，リサイクルプロセスに投入される資源強度の収支として評価する（RI）．
- 有害性は，製品等に含有されている有害物質を無害化（分解あるいはリサイクル）するのに要するエネルギーをポテンシャルとして把握し，資源強度に換算する（HI）．
- 環境効率に基づく強度として，MI，EI，HI，UI，DI，RI，WI，PI があるが，これらのうち，出口側の要素である WI，PI は他の強度（MI，EI，HI，RI）にポテンシャルとして含まれると考えられることから，これらの評価を省略することが妥当であるものとしている．
- E2－PA では，全ての資源強度を統合的に評価する指標として，TI を導入し，ライフサイクルあるいはシステム全体における総効用とそれに対する総消費資源強度の効率として表現している．すなわち，TI は大きいほどよく，これを大きくする方向へ製品やサービスを開発していくことがひとつの指針となる．

3）E2-PA における効用の評価

効用は，製品等の有する性能・機能のうち，消費者の立場から考えた最も本質的なものを定量表現したものである．現在，製品評価においては，「製品の市場価格は効用を表しているのではないか」という考え方に基づき，効用を価格に換算する手法を提案した．こうした効用を定量的に評価する手法は，従来の LCA 手法には見られなかったものであり，E2－PA の特長である．

本研究では，デスクトップ型パソコンの効用の評価例を示したが，従来の LCA ではなしえなかった機能単位，適応技術の異なる製品の比較評価が可能であることを具体的に示した．さらに，効用の要素の感度解析を行うことで新しい製品開発への指針が得られることを，デスクトップ型パソコンを例に示した．

4) E2-PA による統合評価

環境負荷と効用を併せて統合評価した事例を，ノート型パソコンに適用し，E2-PA における統合指標の算出例を示した．従来の LCA 手法のような環境負荷削減効果だけでなく，消費者が求める効用も合わせた製品評価が可能であることを示した．

5）E2-PA の特徴

開発した E2-PA の特長を整理すると以下のようになる．

- 製品やサービス等のライフサイクル全般にわたる環境負荷を「ポテンシャル」として評価することによって，従来の LCA の煩雑性を排除し，設計・企画・開発段階で把握可能なデータのみによる評価が可能である．
- 従来の LCA において統合評価を行う上で避けられなかった主観的価値観による重み付けを排除し，評価実施者に依存しない一貫した評価が可能である．
- 製品やサービスの「マイナスの側面」である「環境負荷」だけでなく，「プラスの側面」である「効用」を消費者の視点から客観的に定量化することが可能である．
- 様々なリサイクル手法を体系化し，妥当性のある評価式を盛り込むことによって，合理的に定量化することが可能である．
- 評価結果を資源量，経済性など目的に応じて様々な表現に換算可能である．

第 4 章

環境配慮型汎用ポンプの設計とその評価

第 4 章　環境配慮型汎用ポンプの設計とその評価

4．1　目的

第 1 章で述べたように，工業製品においては，製品の設計・生産段階における 3R（Reduce，Reuse，Recycle）への配慮の重要性が増しているが，こうした設計手法が十分に浸透しているとはいえない製品も存在する．

本研究で取り上げる汎用ポンプもそのような製品のひとつである．汎用ポンプにおいては，従来，その市場要求要素である小型/軽量化，高性能化/高機能化，低コスト化への改善が構造及び構成材料の変更の主な理由であった．つまり，複数の機能を 1 つの部品に一体化あるいは複合化したり，結合方式においても接着・モールディング，溶着，カシメ，圧入などを採用したりするなど機能的な付加価値を上昇させている反面，分解が難しく単一部品・材料への分別を困難にする傾向にある．また，外郭部品には，ねずみ鋳鉄部品が多く錆びが発生しやすいことと，ボルト類は炭素鋼にメッキまたは防錆塗装を施したものが多く，経年後の発錆によりメンテナンス時の分解作業を難しくしている．さらに，ポンプ機能を維持するために補修部品を定期的に交換するなどメンテナンスシステムも検討され，発達したが，補修部品と構造部品（長寿命部品）の明確な区分けをした設計が行われておらず，時として機能部品の寿命は製品寿命を意味し，更新時には，新規の製品に置き換えるシステムは現在でも大勢を占めている．

そのような情勢の中で，ポンプメーカーによって使用済みとなった汎用ポンプを回収し，自社で再販売する事業が展開されるなど [32]，3R への取り組みが行われつつある．その過程で，使用済みポンプの分解・分別工程の効率化を図ることは必須であり，上記の問題点を改善し，リユース，リサイクル性を考慮した設計手法を導入することが急務となっている．

そこで，本研究では，ポンプの構成部品のうち，資源としての有用性の高い部品を含む電動機の分解性の向上，ならびに使用段階における発展的な構造変更を実現することに主眼をおいた環境配慮型汎用ポンプを開発，試作した．本章では，環境配慮型汎用ポンプの設計コンセプトを述べ，第 2 章で述べた分解性評価指数による分解性評価，第 3 章で述べた E2-PA による環境負荷評価を行い，その設計の改善の効果を示すことを目的とする．

4．2　環境配慮型汎用ポンプの設計

4．2．1　環境配慮型汎用ポンプの設計のコンセプト

汎用ポンプの製品形態は多種多様であるが，構造・構成材料としては似たものが多い．そこで，環境配慮型汎用ポンプの設計を考察するにあたっては，最も汎用的なポンプ形式であるエンドトップ型の陸上用渦巻きポンプを対象とした．渦巻きポンプの主要な形態として，電動機直結式（ポンプ部と電動機を共通ベース上に設置し，たわみ軸継ぎ手で直結する形態），同電動機直動式（電動機の軸端に直接羽根車が取り付けられ，たわみ軸継ぎ手がない形態）がある．後者の「直動式」は，ポンプシステム自体の小型化に寄与するため，陸上用途

では,「直結式」に代わり主流となりつつある．しかし，ここで提案する環境配慮型汎用ポンプでは，省資源化とライフサイクルにおける環境負荷の低減という見地から直動式ポンプとしての設計を試みた．以下，環境配慮型汎用ポンプの設計のコンセプトを述べる.

（1）配慮すべき範疇に電動機を含める.

一般的にポンプ部はポンプメーカーが，電動機部はポンプ部の形状に合わせ電動機メーカーがそれぞれ独自に設計・製造されるが，全体の構成資源の配分からみて，電動機部も同時に改善しないとポンプ全体としての環境負荷削減効果は望めない．電動機一式を 1 部品とするのではなくそれらを構成する各部品も配慮すべき対象とした.

（2）構成部品は，ポンプ性能に影響を与えない範囲で，単一部品，単一材料への分解が容易な構造とし，部品レベルでの交換を可能とする.

（3）部品またはその組み合わせを交換することで，製品全体を交換することなく，使用段階において発展的な構造変更が可能な『“ 成長 ” する製品」[7] となることを配慮する.

（4）主要な外郭部品については，2 世代分の使用を考慮し，その材料，構造を選定する．また，これらを結合するボルト材は腐食しにくい材料とする.

(5)揚水･給水用途に対して水質上の安全性を確保できる接液部材を採用する.

平成 14 年 4 月より「鉛」量をこれまでより厳しく規制する水道法の改正水質基準が施行され同時に給水装置に対する浸出性能基準も併せて改正施行される．少なくともこの新基準を満足するものとした.

以上のようなコンセプトをもとに，従来型と比較して環境的側面，経済的側面など総合的な評価が優るポンプの設計を試みる．結合点数や部品点数が若干増加しても，ライフサイクルにおけるメンテナンス性及びリサイクル性の向上を優先した.

4．2．2　具体的な設計の改善点

（1）ステータ Assy およびロータ Assy の分解の容易化

ステータ Assy には，銅線が含まれていること，また，ロータ Assy もアルミダイキャストされていることもあり，これらの単一材料への分解・分別が付加価値を生むことになる．しかし，その結合方法は Fig.5.1 に示すように，プレスによる圧入あるいは焼きばめが採用されており，容易な方法では分離できない．それにより，従来，これらの寿命あるいはトラブル時には，部品単位の交換は行われず，電動機一式の交換を必要としていた．そこで，これらの結合方法をボルト・ネジ止めあるいはキーに変更し，分解可能とした.

（2）ポンプ軸と電動機軸の分離

従来の直結式における問題点のひとつとして，電動機軸とポンプ軸が一体となっていることが挙げられる．ステンレス鋼を採用した軸材でもメカニカルシールが 3 世代目（約 5～6 年）になるとメカニカルシール取り付け部の損耗が激しく，電動機一式の交換を余儀なくされていた．こうした問題点を改善するため，環境配慮型汎用ポンプにおいては，ポンプ軸と電動機軸を別体とした．そ

れによって，ポンプ軸のみの交換でメカニカルシール取り付け部の損耗を低減することできる.

（3）電動機軸やフランジに JIS 規格品を採用

電動機フランジが該当ポンプ専用の構造となっていることも問題点のひとつといえる．構造上，他の機種との互換性がなくリユースを行うにしても用途が限定されてしまい，分解に要するコストや再生品としての需要が見込めないことなどを鑑みると，リユースやリサイクルによる付加価値が得られない．そこで，環境配慮型汎用ポンプでは，電動機フランジや軸に JIS 規格品を採用し，汎用性を持たせた構造とした．こうした配慮により，将来的に，他の機種やあるいは他の製品へのカスケード的なリユースが可能となるだけでなく，電動機の主流が現在の誘導電動機からより高効率な永久磁石同期電動機等になった場合，製品全体を交換することなく，電動機の交換のみでより高機能なポンプへと“成長”させることが可能となる．以上のような配慮により，分解性の向上のみならず，ライフサイクルあたりの環境負荷の削減が実現されると考える.

（4）ボルト類・接液部材を全てステンレス化

ポンプの外側に配置するボルト類や接液部材料を全て防錆効果の高いステンレス材とし，錆びや結合・勘合部分が固着し，分解不能となることを防ぐ配慮を施した．なお，接液部材料のステンレス化は，前項で述べた水質上の安全性の確保にも寄与する.

（5）ファンへのガラス繊維の混入防止

ファンにおいては，マテリアルリサイクルの容易性の向上を図るため，素材表示を行う．さらに，再生材料の純度の面で難点があり，リサイクルを行う上で障害となっていたガラス繊維の混入を廃止した.

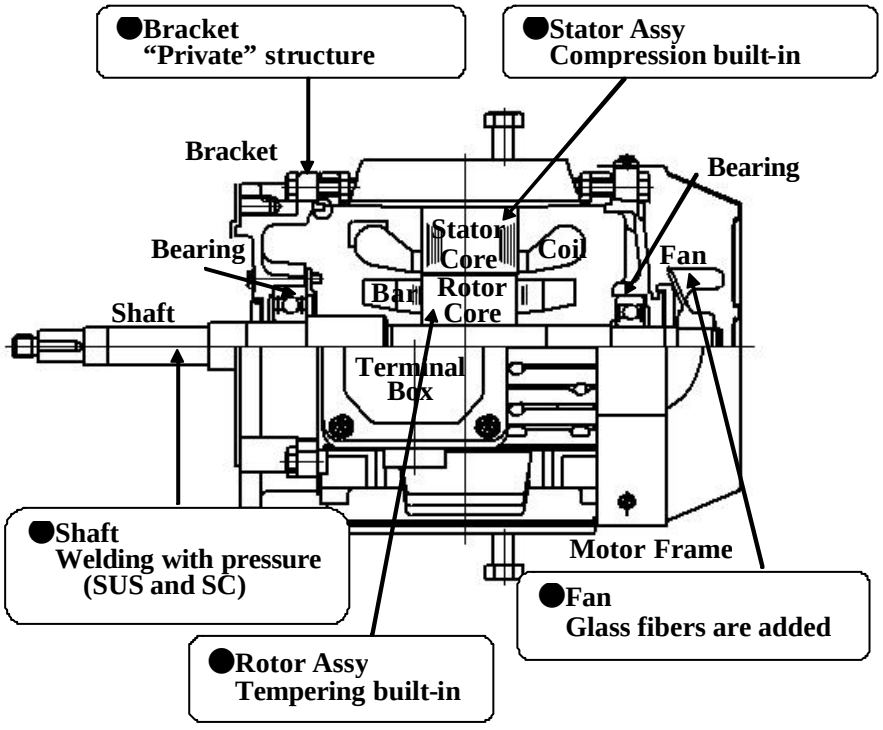


Fig.4.1 Problems of a former motor’ s structure

以上の点を整理した環境配慮型汎用ポンプの設計の要点を Fig.4.2 に, 試作した環境配慮型汎用ポンプの外観を Fig.4.3 に示す.

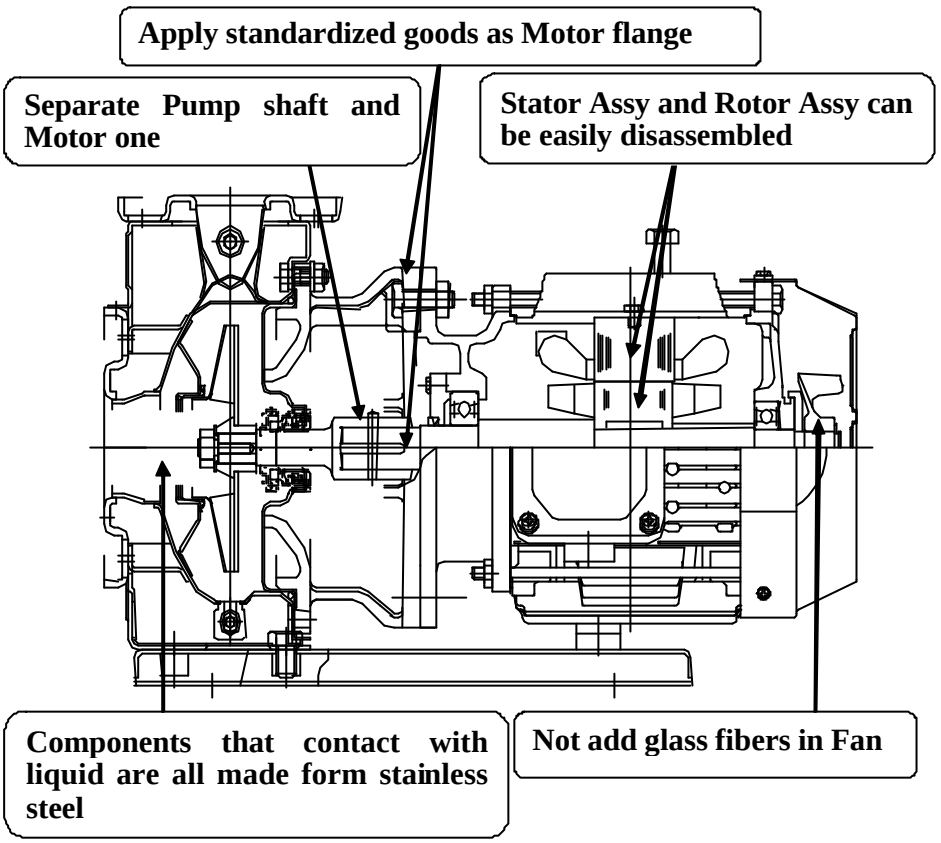

Apply standardized goods as Motor flange
Separate Pump shaft and Motor one
Stator Assy and Rotor Assy can be easily disassembled
Components that contact with liquid are all made form stainless steel
Not add glass fibers in Fan

Fig.4.2 The principal points of Environmental-friendly Pump's Design

Fig.4.3 The appearance of Environmental-friendly Pump (Bore diameter: 50mm, Output: 1.5kW)

Fig.4.4 に試作した環境配慮型汎用ポンプ（口径 50mm，定格出力 1.5kW）のポンプ効率を，同口径，同出力の従来型の結果と併せて示す．同図では，次式で求められる軸動力ベースの効率 η_{pS}，電動機入力ベースの効率 η_{pW} の 2 通りのポンプ効率を示している．

$$\eta_{pS} = \frac{L}{S} \times 100 = \frac{L}{\eta_m W} \tag{4.1}$$

$$\eta_{pW} = \frac{L}{W} \times 100 \tag{4.2}$$

$$L = 0.163QH \tag{4.3}$$

ここで，η_{pS}：軸動力ベースのポンプ効率[%]

η_{pW}：電動機入力ベースのポンプ効率[%]

S：軸動力[kW]　　W：電動機入力[kW]

η_m：電動機効率[%]　　L：理論動力[kW]

Q：流量[m^3/min]　　H：全揚程[m]

ケーシング，羽根車などのハイドロ部品は従来型と同じものを使用しているので，同図における軸動力ベースのポンプ効率 η_{pS} に差はない．本研究で試作した環境配慮型汎用ポンプは，前項で述べたように分解性の向上に重点を置いた設計変更を行っているが，電動機に関しても，Table 4.1 に示すように従来型より高効率となるように配慮している．その結果，電動機入力ベースのポンプ効率 η_{pW} からみると環境配慮型の方が有利となっている．これは，使用時の省エネルギー化に貢献するものであるということはいうまでもない．

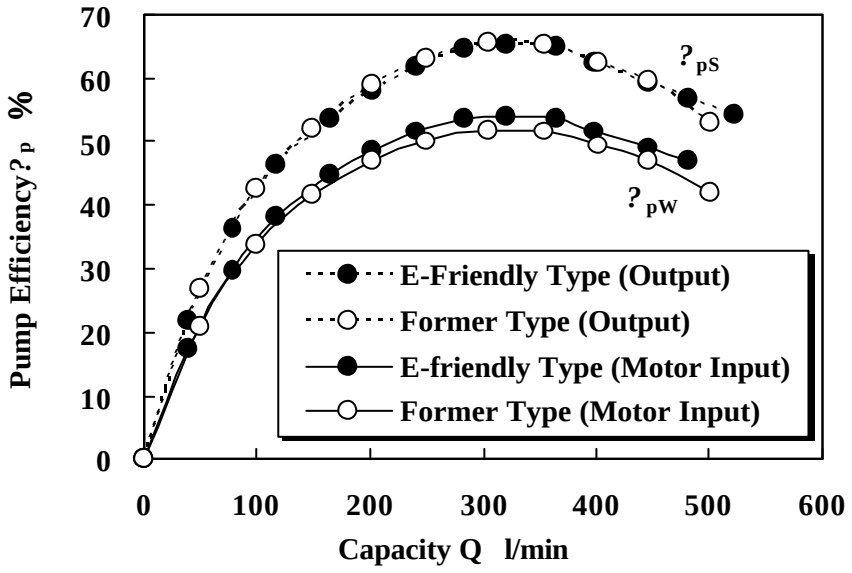


Fig.4.4 Comparison of pump efficiency between former pump and Environmental-friendly one (E-friendly means Environmental-friendly Pump)

Table 4.1 Specification of motors

Model		Former Type	Environmental-friendly Type
Classification		Three Phase Induction Motor	Three Phase Induction Motor
Output	W	1.5	1.5
Volts	V	200	200
Current	A	6.40	6.20
Frequency	Hz	50	50
Poles		2	2
Speed	rpm	2830	2880
Efficiency (100%Load)	%	78.4	82.7

4．3　分解性評価

分解性の向上を意図した設計の改善は，電動機部分に集約されている．したがって，電動機に着目した解体試験及び分解性評価指数による評価を行った．評価対象の電動機の仕様は Table 4.1 に示したとおりである．

4．3．1　解体試験方法及び評価方法

（1）　解体試験方法

実際に，分解しやすい構造となっていることを確認するために，解体試験を行った．解体試験方法については，第 2 章で述べたとおりであるが，要点を整理する．

- 作業者 1 名が手工具による解体試験を行う．
- 採取する解体データは，結合点数，結合の種類，使用工具，部品点数．
- 主要部品を 1 つ（工程によっては複数）取り外す工程を 1 工程の目安とし，その工程において取り外した部品点数，解除した結合点数，結合の種類及び使用した工具を記録する．この作業を繰り返し，合計値をそれぞれについて算出し，それを対象製品の分解データとする．
- 実際には，解体試験をビデオで撮影し，その映像をもとにデータの記録を行う．

（2）評価方法

分解性の評価にあたっては，第 2 章で示した分解性評価指数を適用した．分解性評価指数の算出式を以下に再掲する．

$$D = D_p + D_q + D_r = \Sigma\ (m_i \times p_i) + m \times q + (n-1) \times r \tag{4.4}$$

ここで，D：分解性評価指数

D_p：結合解除に相当する分解性評価指数

D_q：結合探索に相当する分解性評価指数

D_r：部品取り出しに相当する分解性評価指数

m_i：結合種類ごとの結合点数[個]　m：結合点数[個]　n：部品点数[個]

p_i：結合種類ごとの平均結合解除時間に相当する指数[/個]

（結合解除指数）

q：各製品の平均結合探索時間に相当する指数[/個]
（結合探索指数）
r：各製品の平均部品取り出し時間に相当する指数[/個]
（部品取り出し指数）

また，算出に用いた結合解除指数 p_i を Table 4.2 に示す．電動機では，手工具では，解除できない結合が一部存在したが，これらについては，最大の結合解除指数 71 を割り当てることにより，評価に含めることとした．さらに，結合探索指数 q は，式(2.9)の一般式において，Table 2.23 における汎用産業機器の偏回帰係数（*a, b, c, d, e*）を採用することにより得られる．すなわち，q は，次式により算出される．

$$q = 6.19\times10^{-4}\times m - 1.26\times10^{-2}\times n + 5.10\times10^{-3}\times M - 9.84\times V + 4.61 \qquad (4.5)$$

ここで，q：結合探索指数 [/個]
m：結合点数[個]　n：部品点数[個]
M：製品質量[kg]　V：製品容積[m^3]

Table 4.3 に，上式より導出した評価対象の電動機の q を，算出に用いたデータと併せて示している．

部品取り出し指数 r に関しては，一律に式(2.10)より求めた．ここに再掲する．

$$r = 0.285\times\overline{M}p + 2.248 = 0.285\times(M/n) + 2.248 \qquad (4.6)$$

ここで，r：部品取り出し指数[/個]

$\overline{M}p$　：平均部品質量 [kg/個]

同様に，Table 4.4 に r を算出に用いたデータと併せて示す．

5．3．2　評価結果

（1）　解体試験結果

Table 4.5 に解体試験結果を示す．同表には，評価対象電動機の結合点数 m と部品点数 n と，解体試験において，解除不能あるいは分離不可能な部品点数を併せて示している．この結果から明らかなように，環境配慮型電動機では，軸受やロータ Assy やステータ Assy などの主要な部品が個別に分解可能であることが確認された．ただし，ロータ鉄芯からの二次導体の分離及びステータ鉄芯からの巻き線の分離は，電動機効率の低下を招くため，手分解によって行うことはできなくなっている．しかし，ステータ Assy 及びロータ Assy のマテリアルリサイクルは，内部の構成材料の溶融温度が異なるため，比較的容易に行われている．したがって，ステータ Assy，ロータ Assy を分解可能となったことだけでも大きな前進であるといえる．

（2）分解性評価指数の算出結果

Fig.4.5 には，収集した解体データ及び前項で示した算出方法をもとに算出した従来型及び環境配慮型電動機の分解性評価指数を算出した結果を示す．参考として，電動機と同様の方法で算出したポンプ本体の分解性評価指数も併せて

示した．ポンプ本体では，ポンプ軸と電動機軸を別体としたことにより，部品点数，結合点数ともに 1 ずつ増加している．それにより，分解性評価指数が若干増加しているが，製品全体の割合からすると小さいものである．この結果からわかるように，電動機部では，環境配慮型の分解性評価指数が従来型と比較して約 20%削減されており，分解性が向上していることが定量的に確認できた．

Table 4.2 The list of Connection Disassembly Index p_i and each connection number included in motors

Connection Method	Connection Class (Definition)	Connection Disassembly Index p_i	Connection number m_i piece	
			Former Type	Environmental-friendly Type
Screw	Cross socket set screw	10	8	9
	Hexagon socket set screw	14	3	3
	Hexagonal bolt	30	10	13
Fitting	By hand	2	5	7
	By tool	7.5	2	4
	Gear puller	71	1	1
Snap ring	Snap ring pliers	21.5	2	1
Connections that are impossible to disassemble*	-	71	9	4

*We assign the maximum p_i for connections that are impossible to disassemble.

Table 4.3 Motors' Connection Searching Index q

Model			Former Type	Environmental-friendly Type
Connection Number	m	piece	39	41
Parts Number	n	piece	24	24
Mass	M	kg	17.5	18.2
Volume	V	m^3	6.74×10^{-3}	6.74×10^{-3}
Connection Searching Index	q		3.62	3.61

Table 4.4 Motors' Parts Separation Index r

Model			Former Type	Environmental-friendly Type
Average parts' mass	$\overline{M}_P$	kg/piece	0.70	0.73
Parts Separation Index	r		2.45	2.46

Table 4.5 Result of disassembly experiment

Model		Former Type	Environmental-friendly Type
Connection Number*	piece	39	41
Number of connections that are impossible to disassemble by hand	piece	9	2
Parts Number*	piece	24	24
Number of parts that are impossible to separate	piece	9	2
Parts that are impossible to separate		・Bearing ・Bearing board ・Rotor core ・Bar ・Key ・Stator Core ・Coil ・Motor Frame ・Slinger	・Bar (It cannot be separated from Rotor Core) ・Coil (It cannot be separated from Stator Core)

*Including number of connections/parts that are impossible to disassemble/separate

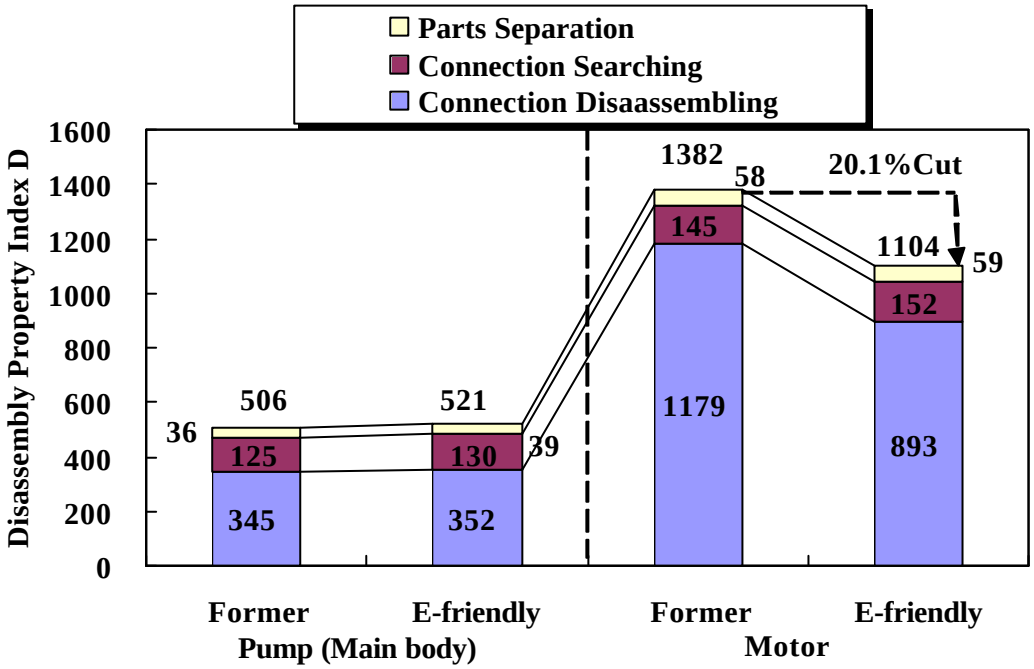


Fig.4.5 Comparison of the Disassemble Property Index between former motor and Environmental friendly one
(E-friendly means Environmental-friendly General-purpose Pump)

4．4　E2-PA による環境負荷評価

以上の結果から，設計の改善を施すにあたって意図していた分解性の向上を確認することができた．本項では，こうした分解性の向上がライフサイクルあたりの環境負荷の削減に繋がることを定量的に示すことを目的に，第 3 章で述べた E2-PA による環境負荷評価を行った．

4．4．1　評価シナリオ

汎用ポンプは製品寿命が長くエネルギー消費型の製品であるため，使用時の環境負荷が圧倒的に大きくなる．したがって，使用時を評価に含めると，環境配慮型汎用ポンプにおける設計の改善の効果が明確に現れてこない．そこで，今回試作した環境配慮型汎用ポンプの導入の効果が現れると期待される分解・分別工程に着目して，評価シナリオを作成した．

その際，Fig.4.6 に示す A 社において現在実施されているポンプの再生販売事業を参考にした．同社では，使用済みポンプを回収し，分別・再生工程を経て，再販売する事業を展開している [32]．なお，ここでいう「再生」とは「部品リユース」を意味する．

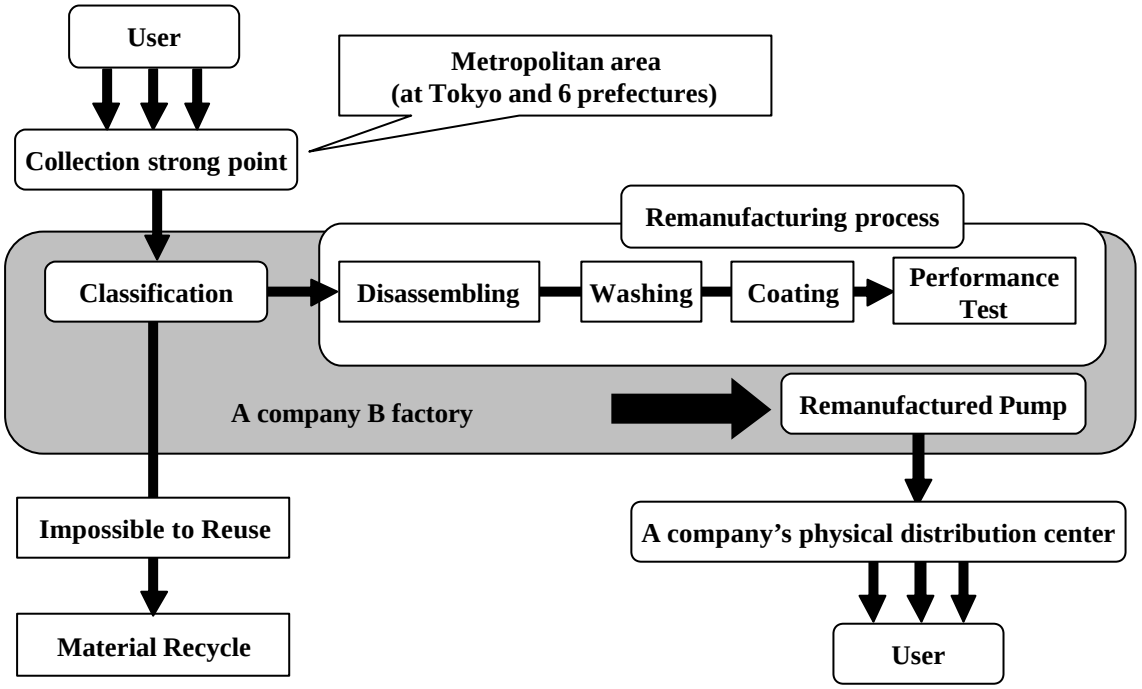


Fig.4.6 Outline of used pump remanufaturing business (A Company)

作成した評価シナリオを Table 4.6 に示す．評価範囲は，第 1 世代の製品が使用済みとなった後から，第 2 世代目の製品が製造されるまでとした．従来型ポンプ（口径 50mm，定格出力 1.5kW）を比較対象として選定し，マテリアルリサイクルケース（CASE1）と，現在，A 社で行われている再生ケース（CASE2）を現状ケースとした．CASE3 が，環境配慮型汎用ポンプの導入を想定したものである．以下に，各ケースの概要を述べる．

Table 4.6 The outline of assessment scenario[*1*2]

CASE	Pump	Recovory Method[*3]		Note
		Pump	Motor	
1	Former Pump	MR	MR	・All metal parts for Material Recycle
2	Former Pump	UC＆MR	MR	・Main body of Pump for Parts Reuse. ・Motor for Material Recycle (It's difficult to Reuse because of its structure)
3	Environmental -friendly Pump	UC＆MR	UC＆MR	・Pump and Motor for Parts Reuse (It's able to Reuse the Motor by exchanging some parts because of improvement of structure)

*1 The target pumps' class: bore diameter: 50mm and output: 1.5kW.
*2 The assessment sphere is from the first generation products' end of life to second generation one's production
*3 MR :Material Recycle, UC :Parts Reuse

（1）マテリアルリサイクルケース（CASE1）

マテリアルリサイクルケースでは，金属部品が全てマテリアルリサイクルされ，再生素材は他の用途で消費されることとした．すなわち，2 世代目には，ポンプ本体，電動機ともに新規に製造する必要がある．解体工程は，機械によって破砕処理等を行うと仮定した.

（2）再生ケース（CASE2）

本ケースでは再生対象部品が全て再生され，2 世代目の製造に活用されると仮定した．ここで，再生対象部品について説明を加える．汎用ポンプでは，各部品の特徴からおおよそどの部品が再生対象となるかが決定されている．Table 4.7 にポンプの構成部品の一般的な処理方式（再生，マテリアルリサイクル，廃棄）を評価対象の従来型ポンプを例に示す. 例えば, ポンプの性能を左右し，磨耗部品でもある羽根車やライナリングは，けして再生対象とはならず，必ずマテリアルリサイクルにまわされる．再生対象となるのは，ケーシングやベースなどの構造部品である．また，Table 4.7 において，「再生」，「マテリアルリサイクル」の双方の欄に「○」が付いている部品は，「再生対象部品であるが，分別工程において再生対象とはならないと判定された場合はマテリアルリサイクルにまわされる」ことを意味する.

なお，本ケースでは，電動機の分解性が困難である従来型ポンプを想定していることから，電動機はマテリアルリサイクルにまわされると仮定した．解体工程に関しては，実態を反映し，手解体を行うとして評価を試みた.

（3）環境配慮型汎用ポンプ導入ケース（CASE3）

環境配慮型汎用ポンプでは，分解性の向上によって，ステータ Assy・ロータ Assy 等の主要部品の交換により，電動機の再生使用が可能となっている．したがって，こうした点を評価に反映した．また，ポンプ本体，電動機ともに手解体を行うことを想定している.

Table 4.7 The example of remanufacturing target parts on pump

Parts name	Remanufacture (Parts Reuse)	Material Recycle	Waste
Casing	?	?	-
Casing cover	?	?	-
O ring	-	-	?
Impeller	-	?	-
Key	-	?	-
Mechanical seal	-	-	?
Motor pillar	?	?	-
Plug	?	?	-
Drain plug	?	?	-
Bracket	?	?	-
Base	?	?	-
Flange	?	?	-

4．4．2　各工程のデータの算出方法

（1）製造段階

（a）$MI_{\_p}$（製造時の物質資源強度）

MI は，鉄，アルミ，銅，プラスチックなどの物質資源に起因する資源強度である．添え字の p は，製造段階を意味する．評価対象サンプルの素材構成データを入手しているので，それらの質量に第 3 章で示した各物質の資源強度換算原単位を乗じることで算出可能である．すなわち，

$$MI_{\_p} = \sum_{x}(m_{Mx} \times mi_{x}) \tag{4.7}$$

ここで，$MI_{\_p}$：製造時の物質資源強度[kg/y]

m_{Mx}：物質 x の投入量[kg]

mi_{x}：物質 x の資源強度換算原単位[kg/y/kg]

なお，本評価では，評価対象範囲の定義から 2 世代目の製造に投入される $MI_{\_p}$ のみを算出する．

（b）$EI_{\_p}$（製造時のエネルギー資源強度）

EI は，重油，軽油や電力などエネルギー資源に起因する資源強度である．部品製造や製品組立において投入されるエネルギーがこれに該当する．$EI_{\_p}$ は，次式で算出される．

$$EI_{\_p} = \sum_{y}(m_{Ey} \times ei_{y}) \tag{4.8}$$

ここで，$EI_{\_p}$：エネルギー資源強度[kg/y]

m_{Ey}：エネルギーy の投入量[kg]

ei_{y}：エネルギーy の資源強度換算原単位[kg/y/kg]

実際の計算では，Table 4.8 に示す文献データ [38)] を用いた．同表の値から製品質量あたりのエネルギー投入量を求め，これを評価対象サンプルの質量に乗じ，さらに，資源強度換算原単位を乗じることによって $EI_{\_p}$ を算出する．なお，同表における「燃料」は原油であるとしている．

Table 4.8 Energy for A Pump's Production[38)]

Energy	unit	Process					Mass kg
		Parts Procution	Assembly	Test and Packaging	Common	Premises transportation	
Electricity	kWh	59.1	3.333	6.667	18.4	?	147.8
Fuel	MJ	66.638	1.66	3.32	44.759	1.292	

（2）解体・リサイクル段階

（a）RI_{mr_w}（マテリアルリサイクル時の再生資源強度）

RI_{mr_w} は，マテリアルリサイクルによる資源の節約効果を現す資源強度である．添え字の w は，解体・リサイクル段階を意味する．その基本式は，式(4.7)に示したとおりであるが，ここでは，Table 3.5 に示した資源強度換算原単位を用いて計算を行った．

また，材料リサイクル工程における投入資源に加え，機械解体に要するエネルギーEI_{mr_w}が投入されるものとした．解体時の投入エネルギーは Table 5.9 に示す文献値[69)]を使用した．同表の値は，製品質量あたりの投入エネルギーであるが，これに製品質量及び資源強度換算原単位を乗じることによって EI_{mr_w} を算出した．したがって，RI_{mr_w}は，次式で算出される．

$$RI_{mr\_w} = \sum_{x}(m_{Mx} \times ri_{mr\,x}) - EI_{mr\_w} \tag{4.9}$$

ここで，RI_{mr_w}：マテリアルリサイクル時の再生資源強度[kg/y]

m_{Mx}：マテリアルリサイクルの対象となる物質 x の投入量[kg]

ri_x：物質 x のマテリアルリサイクル時の再生資源強度換算原単位[kg/y/kg]

EI_{mr_w}：機械解体に要するエネルギー資源強度[kg/y]

Table 4.9 Energy for Disassembling by Machines[64)]

Energy	Disassembling by machines	Unit
Electricity	1.550E-02	kWh/kg
Light oil	6.000E-07	l/kg

（b）RI_{uc_w}（部品リユース時の再生資源強度）

RI_{uc_w} は，部品リユースによる資源の節約効果を現す資源強度である．その基本式を再掲する．

$$RI_{uc\_w} = (MI_{uc\_p} + EI_{uc\_p}) \times d_{uc} - I_{uc\_w}$$
$$d_{uc} = t_{uc} \times p_{uc} \times c_{uc} \tag{4.10}$$

ここで，RI_{uc}：部品リユース資源強度[kg/y]

MI_{uc_p}：リユース対象となる部品の新規製造時の物質資源強度[kg/y]

EI_{uc_p}：リユース対象となる部品の新規製造時のエネルギー資源強度[kg/y]

I_{uc_w}：部品リユース（再生）工程の投入資源強度[kg/y]

d_{uc}：リユース部品の新品部品に対する価値の維持率

t_{uc}：リユース部品期間率

（リユース部品における活用期間と新品部品の活用期間の比率，リユース部品活用期間の期待値/設計耐用期間）

p_{uc}：性能維持率

c_{uc}：リユース可能部品回収率

（リユース部品として回収される確率の期待値）

今回，算出に用いた各パラメータを Table 4.10 に示す．RI_{uc} は，部品ごとに算出したが，部品ごとの性能維持率などの違いは考慮せず全て同一の値を用いた．リユース部品期間率，性能維持率は，A 社において再生されたポンプは，新製品と同じ性能試験をクリアしていることからそれぞれ 1 とした．また，リユース可能部品回収率については，A 社へのヒアリング調査から，使用済みポンプの回収量に対し，再生ポンプの質量割合が約 25%であるとのことから，この値を採用し 0.25 とした.

部品リユース（再生）工程のうち，洗浄，塗装，再組立及び性能試験の各工程の投入資源（EI_{uc_w} とする）は，入手することが困難であったので，部品製造時と同じエネルギー（$EI_{\_p}$ と同値）が消費されるものと仮定した．つまり，

$$EI_{uc\_w} = EI_{\_p} \tag{4.11}$$

ここで，EI_{uc_w}：部品リユース工程における洗浄，塗装，再組立及び性能試験に要するエネルギー資源強度[kg/y]

$EI_{\_p}$：製造時のエネルギー資源強度[kg/y]

さらに，部品リユース時の再生資源強度 RI_{uc_w} を算出するにあたっては，上記に加え，手解体工程において，以下に述べる労働資源強度（LI：Labor Intensity）を算出し，手解体作業による労働性を評価に含めることを試みた．製品のリユースやリサイクルには，多分に人間の労働（分解作業）が寄与しており，これを適切に評価に含めることは環境負荷評価における重要な課題である．労働資源強度は，こうした点を改善するために，労働力を資源強度に換算する手法として提案しているものである．労働資源強度の算出式を以下に示す.

$$LI = L \times li_A \tag{4.12}$$

ここで，LI：労働資源強度[kg/y]

L：労働量[人時]

li_A：該当地域における労働資源強度換算原単位[kg/y/人時]

労働資源強度換算原単位 li_A の算出にあたっては，ます，地域の労働人口，労働時間，主要な資源の総消費量（金属，エネルギー）を文献 [56] から求める．そして，消費資源量を，可採年数によって重み付けを行い，資源強度として統合化を図る．ただし，エネルギー消費量については，産業部門の消費量を除外している．これは，地域内で消費されずに輸出される分も含まれていることを考慮しての措置である（金属資源については，産業部門，民生部門等の内訳が不明であったため，総消費量を重み付けの対象とした）．得られた資源強度を該当地域の労働人口と労働時間の積で除することにより，li_A を得ることがで

きる．以下に算出式を示す．

$$li_A = \frac{MI_{TA} + EI_{TA}}{P_L \times T_L} \tag{4.13}$$

ここで，MI_{TA}：該当地域において消費される物質資源強度[kg/y]
EI_{TA}：該当地域において消費されるエネルギー資源強度[kg/y]
（ただし，産業部門を除いた値）
P_L：労働人口[人]　T_L：労働時間[時]

労働条件は，地域，国によって大きく異なるため，Table 5.11 に示すように国別の li_A を算出しているが [70]，ここでは，日本の値を使用する．また，分解作業は 1 人で行うものとして，前出の分解性評価指数 D を分解に要する作業時間と仮定して労働資源強度を算出した．すなわち，部品リユース工程における労働資源強度を LI_{uc_w} とすると，次式で算出される．

$$LI_{uc\_w} = li_{JPN} \times p_L \times (D/3600) \tag{4.14}$$

ここで，LI_{uc_w}：部品リユース工程における労働資源強度[kg/y]
li_{JPN}：日本の労働資源強度換算原単位[kg/人時]
p_L：作業人数（=1）[人]
D：作業時間（分解性評価指数に相当）[時]

したがって，式(5.10)における部品リユース工程の投入資源強度 I_{uc_w} は次式で求めることができる．

$$I_{uc\_w} = EI_{uc\_w} + LI_{uc\_w} \tag{4.15}$$

以上により，部品リユース時の再生資源強度 RI_{uc_w} が算出することができる．

Table 4.11 Unit Labor Intensity of Principal Country (li_A)

Country	Unit Labor Intensity li_A kg/y/ (person*hour)
Japan	3.364E-02
The United States of America	1.069E-01
United Kingdom	4.774E-02
Germany	5.567E-02
France	5.690E-02
Russia	5.309E-02
South Korea	3.940E-02
China	6.036E-03
India	3.340E-03

Table 4.10 Parameter for Calculation of Recovery Intensity for Parts Reuse (RI_{uc_w})

Subject	Term ratio t_{uc}	Performance Ratio p_{uc}	Probability that the collected part is able to reuse c_{uc}
All parts	1	1	0.25*

*By the investigation for A company the collection rate of pumps that are able to remanufacture and sales is 25%.

4．4．3　評価結果

（1）各 CASE の比較

Fig.4.7 に評価結果を示す．同図では，$MI_{\_p}$，$EI_{\_p}$ による投入資源量をプラス側に，$RI_{\_w}$ による回収資源をマイナス側に示している．CASE1 と 2 を比較することにより，再生ケースの環境負荷削減効果が非常に大きいことがわかる．さらに，CASE3 では，環境配慮型汎用ポンプの導入によって，資源強度がケース 2 より 35.9%削減されており，その有効性が現れている．これは，電動機の再生が可能となり，電動機の新規製造分の投入資源量が削減されていることによるものである．以上の結果から，分解性の向上がライフサイクルあたりの環境負荷削減につながることが確認できた．

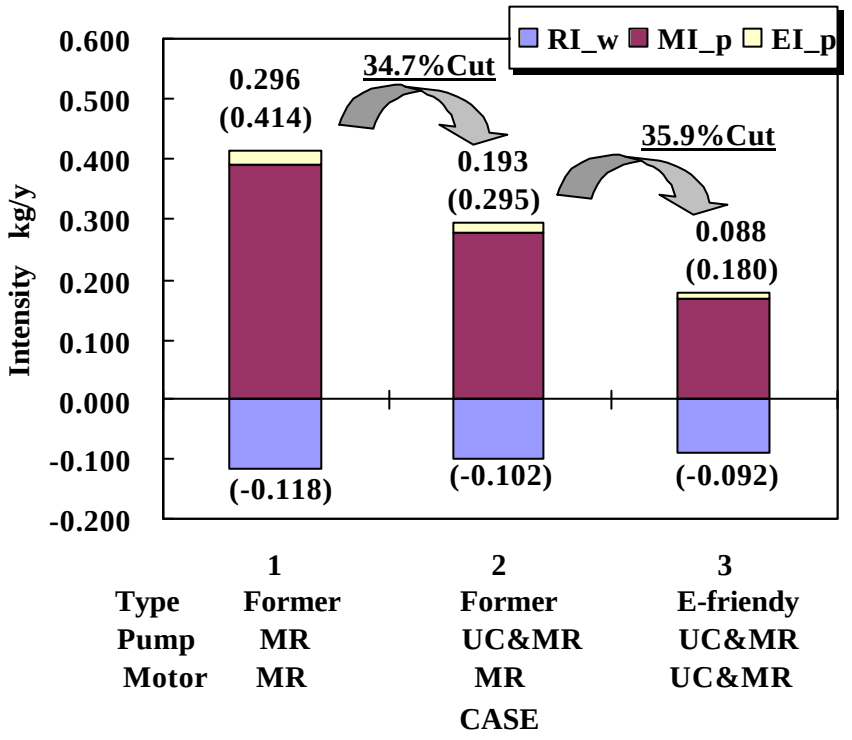


Fig.4.7 Assessment Results of Respective CASE

（2）感度解析と E2-PA の応用

Fig.4.7 に示した結果の感度解析を行い，評価結果の解析を行う．CASE3 では，新規製造分の投入資源量が削減されたことによって，大幅な環境負荷削減が図

られている．しかし，実質的に回収した資源量を表す RI に着目すると，必ずしも大きな効果が得られていない．これは，現状のリユース部品の回収率が低い（25%）という条件下で資源強度を算出したことによる．しかし，今後，循環システムの高度化によって，この回収率が増大することが予想される．そこで，リユース可能部品回収率 c_{uc} をパラメータとして，この値が変化したときの各 CASE の資源強度の変化を算出した．Fig.4.8 に算出結果を示す．当然のことながら，c_{uc} が高くなるにつれて，RI_{uc_w} が大きくなるので CASE2，3 の資源強度は低くなる．このように循環システムの高度化を図ることで環境配慮型汎用ポンプの有効性が増すことがわかる．

また，E2-PA では，資源強度を様々な形に変換することができる．ここでは，評価結果を原油価格に換算し，経済性の観点からの評価を試みる．可採年数で重み付けをした資源強度を Irp とし，原油価格換算した資源強度を Iop とすると以下のように換算する．

$$I_{op} = I_{rp} \times y_{op} \times \frac{1}{k} \times p_o \qquad (4.16)$$

ここで，I_{op}：原油価格換算時の資源強度[円/L]
y_o：原油の可採年数（=44.4）[年]
k：単位換算係数[kg/L]
p_o：原油価格[円/L]

Fig.4.9 に，評価結果を示す．同図では，横軸に原油価格をとり縦軸に原油価格換算した資源強度 Iop をとっている．近年，原油価格の高騰が続いているが，原油価格が高くなるにつれ，CASE2，3 の環境負荷削減効果が大きくなる．同時に，リユース可能部品の回収率が増大すればさらなる環境負荷の削減を図ることができる．以上の結果から，環境に配慮した製品の導入はエネルギー問題としてもみてもその有効性を伺うことができる．このように，E2-PA では，様々な形に評価結果を変換することが可能である．また，リユース可能部品回収率や原油価格をパラメータとすることで，長期的な視点から評価を行うことも可能である．

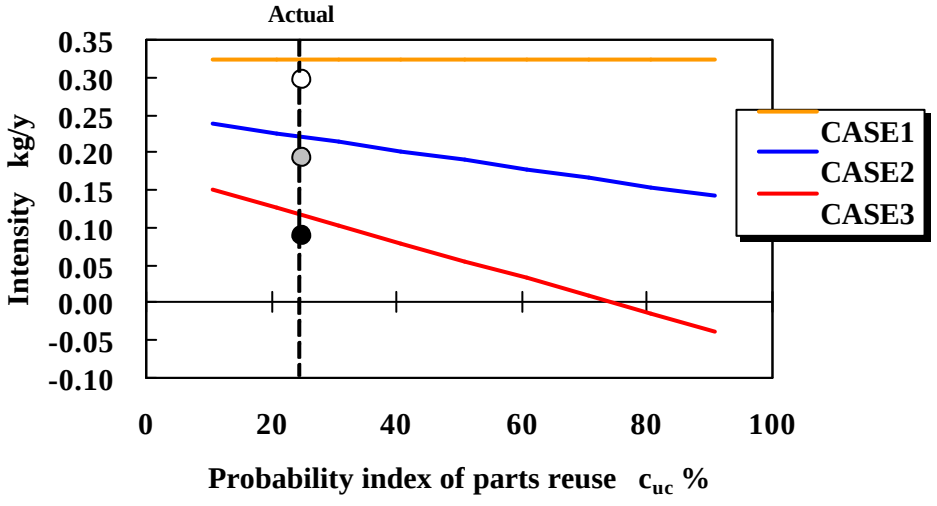


Fig.4.8 Sensitive analysis by probability index of parts reuse

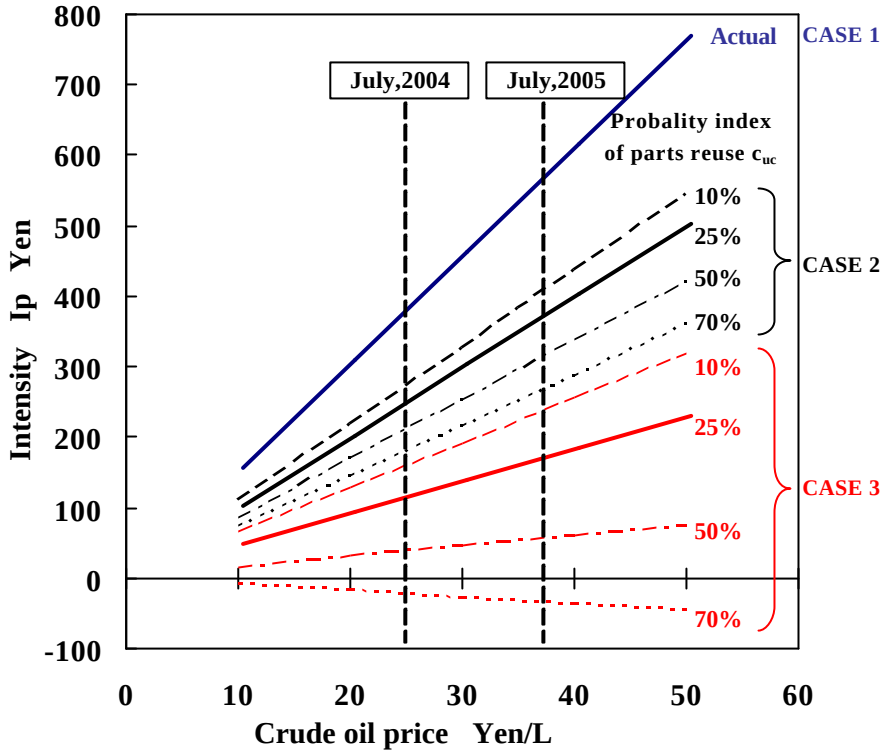


Fig.4.9 Conversion of intensity to crude oil price and assessment result

4．5　“成長”する製品の効果の確認

本研究における環境配慮型汎用ポンプは，電動機の“成長”を考慮している．Fig.4.10 は，電動機をより高効率なタイプに“成長”させたときの外観を示したものである．Table 4.12 に高効率タイプの電動機の仕様を従来型及び今回試作した環境配慮型電動機と併せて示す．環境配慮型汎用ポンプは，軸やフランジに JIS 規格品を採用しているため，簡便に電動機を変更することができる．Fig.4.11 に“成長”製品の電動機入力あたりポンプ効率 η_{pW} を示すが，言うまでもなく電動機効率の向上の分だけ改善がみられる．

現在，こうした高効率な電動機が実用化されつつあるものの高コストで市場競争力がなく，汎用ポンプに導入される段階には至っていない．しかしながら，本研究におけるポンプのように予め構造変更をすることを前提とした設計手法を導入しておくことにより，高効率電動機が市場における競争力を得た時点で，ポンプ一式を置き換えることなく，電動機の交換のみで高性能化を実現することができる．

なお，ここでは電動機全体としての“成長”の例を示したが，ステータ Assy，ロータ Assy のみの交換による“成長”も可能であり，今後の技術の進歩の動向に合わせた構造変更に対応できる．こうした設計思想がより広範囲の電動機に適用されることが望まれる．

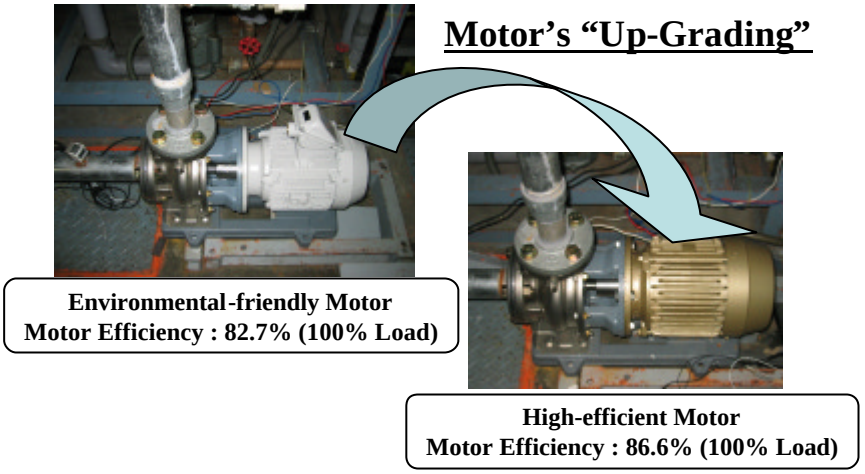


Fig.4.10 The motor's "Up-Grading" on Environmental-friendly Pump

Table 4.12 Specification of high-efficient motors for "Up-Grading" comparing with former type and Environmental-friendly Type

Model		Former Type	Environmental-friendly Type	High Efficient Type for "Up-Grading"
Classification		Three Phase Induction Motor	Three Phase Induction Motor	Three Phase Induction Motor
Output	W	1.5	1.5	1.5
Volts	V	200	200	200
Current	A	6.40	6.20	5.80
Frequency	Hz	50	50	50
Poles		2	2	2
Speed	rpm	2830	2880	2880
Efficiency (100%Load)	%	78.4	82.7	86.6

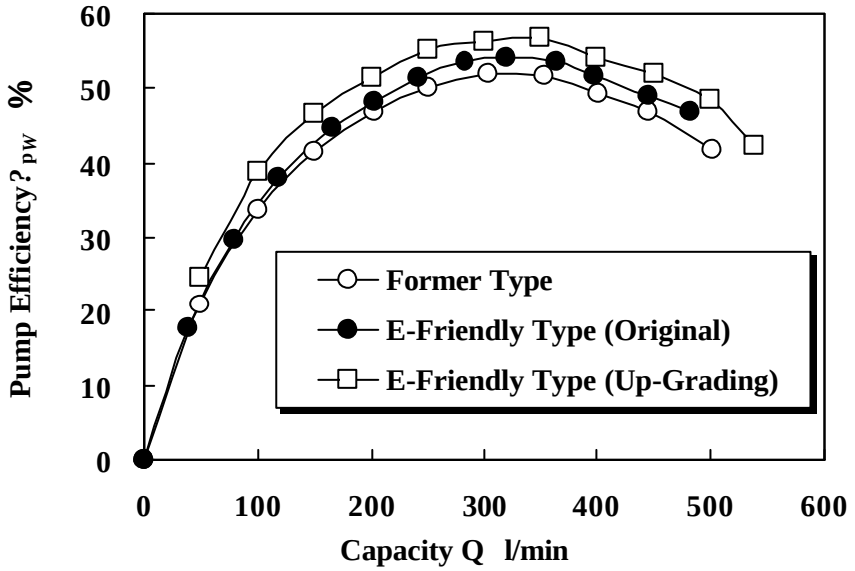


Fig.4.11 The improvement of pump efficiency (based on Motor Input) by motor's "Up-Grading"

4．6　まとめ

3R（Reduce，Reuse，Recycle）を考慮した設計手法の導入が要請されている中で，その対応が遅れている汎用ポンプを題材として設計の改善を試みた．そして，資源としての付加価値の高い部品を有する電動機の分解性の向上，使用段階における発展的な構造変更を可能とする「“成長”する製品」の概念の導入に主眼を置いた環境配慮型汎用ポンプを開発した．また，第 2 章で述べた分解性評価指数，第 4 章で述べた環境効用ポテンシャル評価手法（E2-PA）により，環境配慮性という観点からの定量的な評価を行った．さらに，“成長”する製品の効果を確認するために電動機の性能向上を例とした検討を行った．以下に，要点を示す．

1) 環境配慮型汎用ポンプの設計

ライフサイクルあたりの環境負荷の低減を指向した環境配慮型汎用ポンプを開発・試作した．設計の改善ポイントは，以下に示すとおりである．

- ステータ Assy，ロータ Assy を分離可能としたこと．
- ポンプ軸と電動機軸を分離し，磨耗部品であるポンプ軸の交換を容易としたこと．
- 電動機フランジや軸に JIS 規格品を採用することにより汎用性を持たせた構造としたこと．
- 上記により，発展的な構造変更を可能とし，「“成長”する製品」の概念を導入したこと．
- ボルト類や接液部材料を全て防錆効果の高いステンレス材とし，水質上の安全性を確保するとともに，錆びや結合・勘合部分が固着し，分解不能となることを防ぐ配慮を施したこと．
- ファンにおけるガラス繊維の混入を廃止し，マテリアルリサイクルの容易性を確保したこと．

2) 分解性評価

電動機に着目した分解試験を行ったところ，環境配慮型電動機では，ステータ Assy やロータ Assy などほとんどの部品が分解可能であることを確認した．また，筆者らが開発している分解性評価指数による評価では，環境配慮型電動機は従来型電動機と比較して，約 20%の改善がみられた．

3) 環境負荷評価

分解・リサイクル工程に着目した環境負荷評価を行ったところ，環境配慮型汎用ポンプの導入により，従来型ポンプの再生販売を行うケースと比較して，約 36%の環境負荷の削減効果があることを示した．

4)“成長”する製品の効果の確認

電動機の性能向上を例に，“成長”製品のコンセプトを具現化し，その効果を示した．

第 5 章

特殊 IC タグを用いたライフサイクル管理システムの開発とその応用による運用の高度化

第 5 章　特殊 IC タグを用いたライフサイクル管理システムの開発とその応用による運用の高度化

5．1　目的

本章では，本研究の第一の目的である製品の総合的なライフサイクル管理システムの構築を目的とした検討を行う．ライフサイクル間での情報の受け渡しに特殊 IC タグを活用することにより,ライフサイクル全般にわたる環境負荷の情報を収集・活用することが可能なシステムの開発を試みる.

本章では，製品のライフサイクル管理システムを構成する個別技術の開発の成果を述べる．まず，ライフサイクルにおける情報の受け渡しを行う特殊 IC タグシステムに関しては，従来の RFID タグとは異なり，製品固有の識別情報のみならず，機器の運用情報を収集・蓄積することが可能な特殊 IC タグシステムのプロトタイプを開発・設計・試作した．ライフサイクル管理を実現するために必要な記録情報を整理するとともに，それを実現するハードウェアおよびソフトウェアを開発した.

また，IC タグで記録した運用情報を取得し，効率的なモニタリングを可能とする“運用情報管理システム”に関しては，シミュレーションや実験によりその運用情報を収集・管理することの有効性を示すことを目的とした各種の検討を行った．まず，タグの記録情報により，使用実態が不明な汎用ポンプの運転状態が容易に把握できることをシミュレーションにより示し，省エネルギー診断の効率化が実現できることを示した．また，明確な診断手法が確立されていない劣化状態や異常状態の検知に関しても本システムが有効であることを，実験により確認することを試みた．具体的には，羽根車の磨耗や軸心のずれ等の劣化・異常状態を実験的に再現し，正常運転時との違いが特殊 IC タグに記録される運用情報に反映されるかを検討した．さらに，試作した特殊 IC タグシステムを実際に稼動しているポンプに取り付け，その機能を実証するとともに，当該ポンプの使用履歴が容易に予測可能であることを示した．以上の検討を踏まえ,特殊 IC タグシステムとの連携を考慮した運用情報管理ツールも併せて開発する.

こうした運用情報管理システムは，送風機や圧縮機など他の汎用産業機器はいうまでもなく，使用・運用段階で電力などのエネルギーを消費する製品にも適用可能である．そこで，本システムの他の製品への応用例として自動販売機を取り上げ，その有効性を検討した．自販機では，各種の省エネルギー対策技術が開発されているが，実際の運用段階においては，それらが有効に活用されておらず，結果的に大きな無駄を生じている．そこで，早稲田大学大久保キャンパスに設置された 29 台の自販機を対象とし,運用情報管理システムの適用可能性を検討するとともに，運用の高度化による省エネルギー効果を検討した．具体的には，運用情報管理による簡易的な診断を行い，利用可能な時間帯に応じて，照明の設定変更や圧縮機の停止など既存の機能を有効に活用した省エネを実践し，その効果を把握する．さらに，第 3 章で述べた E2-PA による環境効

率性を考慮した運用段階の LCA を実施する．これにより，省エネルギー性だけでなく，容器や商品補充の効率など様々な観点を考慮した運用管理の問題点が把握可能となる．さらに，さらなる環境負荷の低減を図ることを目的に，運用情報と製品情報に基づき，実際の運用における消費電力量を予測する重回帰式を構築し，それによる省エネルギー効果のシミュレーションを行う．具体的には，売上に応じて自販機の容量，設置台数を最適化させたときにどの程度の省エネルギー効果が得られるかを試算する．

以上により，体系的な製品のライフサイクル管理システムを構築し，必要となるハードウェア・ソフトウェアを開発およびその有効性の検討を行うとともに，運用の高度化を図ることの環境負荷削減効果を定量的に示すことを本章のねらいとする．

5．2　ライフサイクル管理を目的とした特殊 IC タグシステムの開発

5．2．1　特殊 IC タグシステムの概要と構成要素

（1）概要

IC タグの開発は，入退室管理に始まり，最近では定期券等のアプリケーションで幅広く普及しているが，IC タグに入力されている情報を読み出す程度の機能が一般的である．本研究で開発する特殊 IC タグは，製品情報の記憶・保持とともに機器の運用情報の定期的な蓄積とそのデータの送受信を実現する点に独自性を持たせている．Fig.5.1 に特殊 IC タグシステムのイメージを示す．特殊 IC タグシステムは，特殊 IC タグ部，送受信端末である RW 及び PC のデータ管理を行うソフトウェアで構成される．リーダ/ライタは，複数のタグとの交信を行うことを考慮し，ハンディタイプとしている．この両者は，微弱無線により通信を行い，2～5m の無線通信が可能となっている．

以下，特殊 IC タグシステムの構成する要素の機能を述べる．

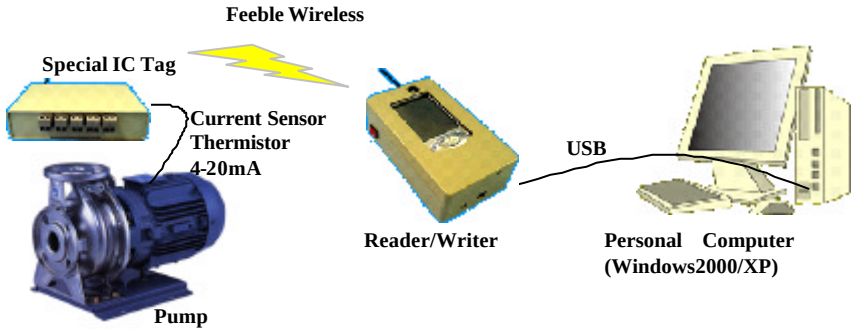
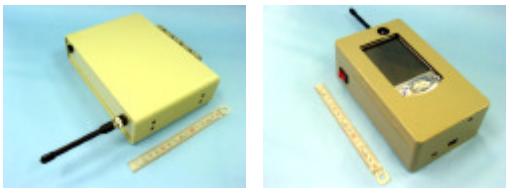


Fig.5.1 Image of Special IC Tag System



(a) Special IC Tag　　(b) Reader/ Writer (RW)

Fig.5.2 Outward of Special IC Tag System

（2）特殊 IC タグシステム部

Fig.5.2 (a)に特殊 IC タグの外観を示す．機器の電流，温度等の物理情報を受け取り，それを蓄積・外部と情報交換する機能を有する．汎用ポンプ固有の情報として製品銘板，メンテナンス情報を記録し，また，稼動情報のモニタリングを行うため，汎用ポンプに取り付けられた各種センサ（電流，温度，4-20mA ×2 個）とのインターフェースを持つ．さらに，タグ部は，取り付けるポンプの動力線から電源用カレントトランス（以下，CT という）を経由して微小電流を取り出すことで電源を生成する方式としている．そのため，①外部電源を必要とせず，ポンプの寿命に対応した長期のデータ収集を行うことが可能である，②設備の変更を要することなく，機器への取り付けが容易である，という利点を有する．

（3）RW 部

Fig.5.2 (b)に特殊 IC タグの外観を示す．特殊 IC タグ部と微弱無線による無線通信（通信距離約 2～5m）を行い，汎用ポンプ固有の情報としての製品銘板，メンテナンス情報などのデータを特殊 IC タグに記録するとともに，特殊 IC タグ部に記録されている製品銘板，運用情報，メンテナンス情報など全ての記録情報を取り出すことができる特徴を持つ．また，USB インターフェースを備え，PC とのデータ通信を行い，上記データ（製品銘板，メンテナンス情報，運用情報）についてデータの相互交換を行う．データ表示のための画面表示機能と入力操作のためにボタンキー等の入力機能を持ち，かつ，持ち歩くことが可能な程度の大きさとした．

（4）PC 部

USB により，製品銘板，メンテナンス情報の登録と RW へのデータ送信及び RW からのデータ吸い上げを行う．RW で取得したデータは，PC へ CSV 形式で出力される．

5．2．2　特殊 IC タグの記録情報

特殊 IC タグでは，Table 5.1 に示すように大別して IC タグ識別情報，製品銘板情報，メンテナンス情報，ポンプ運用情報の 4 種類を記録する．同表では記録情報のデータサイズも併せて示している．タグ識別情報は，タグ自身の識別を管理するためのものであり，管理 No.やプライベートアドレスを記録可能とした(Table 5.2)．製品銘板情報は，機器固有の情報を表すものであり，タグの設置時点で書き込むことになる(Table 5.3)．メンテナンス情報は，メンテナンスを行った際に適宜書き込むことができる(Table 5.4)．

本システムの特長である運用情報については，ポンプの稼動状態を把握し，省エネ診断や適正な運転方法を検証するにあたり，最低限必要な情報を記録するというコンセプトをもとに Table 5.5 に示す項目を記録可能な仕様とした．運転時間，起動停止回数を累積し，電流（最大，最小，現在値），温度（最大，現在値）を記録可能としている．また，拡張用として 4-20mA のインターフェースを 2 ポート有している．なお，電流，温度，4-20mA に関しては，予め設定されたレンジに従い，各レンジに対応した運転時間を累積することが可能とな

っている．

運転時間は，ポンプ電源，すなわち，特殊 IC タグの CT 電源が入っている時間を運転時間としてカウントする．起動停止回数は，CT 電源に入った回数をカウントする．最大及び最小電流値，最大温度に関しては，ポンプ運転中の最大あるいは最小値をピークホールドすることにより記録する．また，電流，温度の各レンジの対応運転時間は，予め設定されたレンジに入っている運転時間をカウントすることにより得られる．4-20mA に関しても，電流及び温度と同様の方式で記録する．

Table 5.1 Special IC tag information

No.	Information	Data Size *
1	IC Tag Distinguishing Information	35w
2	Product’s Information	113w
3	Maintenance Information	64w
4	Operating Information	164w
Total		376w

* 1w = 8bit

Table 5.2 Detail of IC tag distinguishing information

No.	Information	Data Size w
1	Management No.	4w
2	Private Address	4w
3	Broadcast Address	4w×3
4	Program Version Information	20w

Table 5.3 Detail of product’s information

No.	Information	Data Size
1	Model Name	20w
2	Serial No.	13w
3	Production Date	8w
4	Product’s Code	11w
5	Capacity	6w
6	Head	6w
7	Speed	4w
8	Output	4w
9	Voltage	5w
10	Current Range	4w
11	Temperature Range	4w
12	4-20mA range (No.1)	4w
13	4-20mA range (No.2)	4w
14	Current Range Segment	2w×4
15	Temperature Range Segment	2w×4
16	4-20mA Range Segment (No.1)	2w×4
17	4-20mA Range Segment (No.2)	2w×4

Table 5.4 Detail of maintenance information

No.	Information	Data Size w
1	Pump	24w
2	Private Address	4w
3	Broadcast Address	8w×5
4	Program Version Information	4w×5

Table 5.5 Detail of operating information

No.	Information	Data Size
1	Running Time	8w
2	Boot Frequency	8w
3	Current (Maximum)	4w
4	Current (Current)	4w
5	Current (Minimum)	4w
6	Running Time of Respective Current Range	8w×5
7	Temperature (Maximum)	4w
8	Temperature (Current)	4w
9	Running Time of Respective Temperature Range	8w×5
10	4-20mA range (No.1, Maximum)	4w
11	4-20mA range (No.1, Current)	4w
12	Running Time of Respective 4-20mA Range (No.1)	8w×5
13	4-20mA range (No.2, Maximum)	4w
14	4-20mA range (No.2, Current)	4w
15	Running Time of Respective 4-20mA Range (No.2)	8w×5

5．2．3　詳細設計

（1）特殊 IC タグ

（a）設計にあたっての諸条件

前述した通り特殊 IC タグは，汎用ポンプ固有の情報として製品銘板，ポンプ運用情報，メンテナンス情報を記録する．このうち運用情報についてはポンプの稼動情報のモニタリングを行うため，汎用ポンプに取り付けられた各種センサとのインターフェースを持つ必要がある．

記録情報の確認（読取り）と追加を行う手段としては，ポンプの設置箇所によっては外部通信機器との接触が困難であるケースやユーザーの使用環境の効率性を考慮し，RW と無線通信を行うこととした．

電源供給については，取り付けるポンプの動力線から CT を経由して電流を取り出すことで電源を生成する．ポンプ停止時も考慮して外部電源入力も用意した．

以下，これらの諸条件に従った特殊 IC タグの機能を整理する．

- ポンプの電力線に電流センサを取りつけ，ポンプの稼動状況のデータを記録する（電流範囲：0～30A）．
- サーミスタによる温度計測を行い，データを記録する（ただし，150℃以下）．
- システムの電源はポンプの動力線から CT で生成する．
- ポンプ停止時はバックアップ電池で動作する．
- 記録したデータは RW との無線通信することにより取り出す．
- 拡張用に 4-20mA 入力を 2 チャネル用意する．
- 電源供給がない場合を想定して外部電源入力を用意する．

（b）ブロック図

Fig.5.3 に特殊 IC タグのブロック図を示す．同図に基づき，各部の機能につ

いて説明する.

a）CPU

日立の H8S（HD64F2238R）を使用した．電源は 3.3V，動作周波数は低消費電流とするため 2MHz とする．ソフトウェアスタンバイからの復帰のために外部 A/D コンバータと無線モジュール,電源供給変化を割り込みとして用意した．H8S 内蔵 A/D も使用できるようにした．4CH は常時使用で，充電時の温度制限のためにサーミスタを接続する.

b）リセット IC

電源監視 IC としてミツミの PST597 を使用した．電源電圧が 2.9V でリセット解除をする.

c）FlashROM

FlashROM は富士通の MBM29LV320T を使用した．16 ビットアクセスと 8 ビットアクセスの両方出来るようにする．16 ビットアクセスではワード転送のみ使用可能である．ダウンロード用シリアルインターフェース SCI2 と上位アドレスが同じため,デバック中は 0 番地から 128KB 分までしかアクセスできない.

d）無線モジュール

EPSON の S4E1672400 を使用した．CPU のポートを 4 本使い，送受信のデータ, クロックとして通信を行う. 無線モジュールの受信通知用として SCLKOUT を IRQ5 に接続する．通信方式は微弱無線とした.

e）デバック用 RS232C

H8S 内蔵 FlashROM 書き換え用とデバック用シリアルに使用するため，SCI2 に 3.3V 対応トランシーバとコネクタを用意した.

f）外部 A/D コンバータ

MAXIM の MAX1091 を使用した. CPU 内蔵 A/D と同様 10 ビット変換である．変換終了割り込みを IRQ0 に接続する．ホストインターフェースはパラレルで 10 ビット変換のため変換値は 2 度読み，上位，下位の選択（HBEN）は CPU のポートで指示する.

g）切換回路（センサ入力部）

センサ入力の信号を外部 A/D コンバータへ接続するか，CPU 内蔵 A/D へ接続するか，切り替える回路．ジャンパで選択し，選択されない方はジャンパで GND へ接続する.

h）電圧変換回路，入力保護回路（センサ入力部）

電流測定用センサはサージ対策を施し，電圧変換して A/D へ入力する．温度はサーミスタで，抵抗との分圧値を A/D へ入力する．入力部にはサージ対策を施す．4-20mA 入力はサージ対策を施し，OP アンプの I-V 変換回路を通り A/D へ入力する．非絶縁のため，出力側で絶縁されていなければならない．4-20mA 入力は 2 入力用意する.

i）センサ入力コネクタ（センサ入力部）

電流測定用センサ，サーミスタ，4-20mA（2 個）の 4 入力を用意する.

j）電源用 CT 接続コネクタ（電源供給部）

電源用 CT が接続できるようにする．コネクタは端子台を使用する.

k）AC アダプタ入力用 DC ジャック（電源供給部）

外部からの電源供給を考え，ジャックを用意する．

l）供給切換回路（電源供給部）

AC アダプタが電源を供給している時は CT 電源を使用しない．CT 検出と外部電源検出を CPU のポートへ接続する．

m）定電流・定電圧回路（電源供給部）

CT または AC アダプタからの電圧を 3.3V 一定にする．電池充電回路へは 20mA 一定にする．CT または AC アダプタ電源から電池へ，また電池から CT または AC アダプタ供給への変化を通知するため IRQ2 へ接続している．

n）充放電回路（電源供給部）

電池の過充電検出回路，過放電検出回路，電池供給電圧の 3.3V 一定供給を行う．過充電検出，過放電検出と電池充電 ON/OFF（過充電時に充電を止めるため），電池放電 ON/OFF（過放電時に止める，ただし供給が止まるためシステムが停止する）信号を CPU のポートに接続している．過放電を通知するために IRQ1 へ接続する．

o）ニカド電池（電源供給部）

使用温度範囲が広いためニカド電池とした．電池駆動時の温度制限はないが，充電時は電池の保証範囲として 0～70℃までとなっている．

p）電源選択回路（電源供給部）

CT または AC アダプタ供給か，電池供給かを選択する．

Fig.5.4 は，以上の設計に基づく特殊 IC タグの内部構造を示したものである．

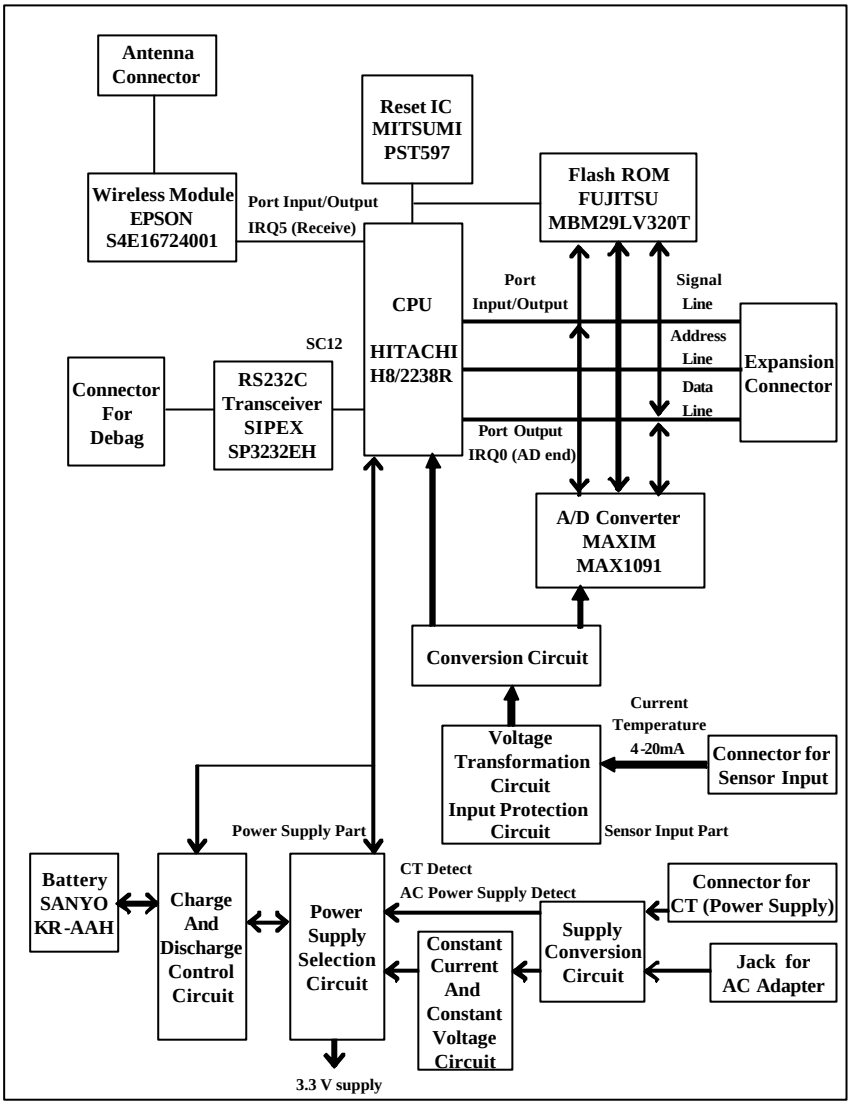


Fig.5.3 Block diagram of Special IC Tag

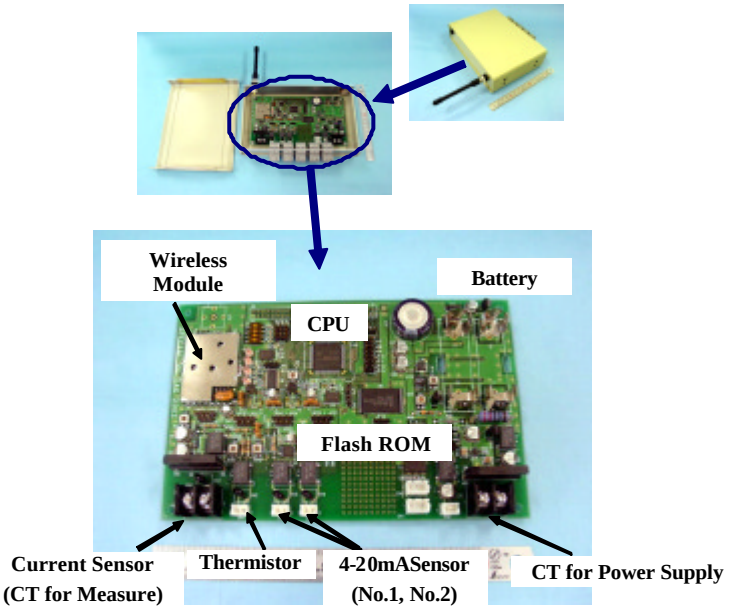


Fig.5.4 Structure of Special IC Tag

（2）RW

（a）設計にあたっての諸条件

RW は，特殊 IC タグおよび PC とデータの授受を行う．特殊 IC タグに対してはポンプ稼動情報の収集（受信）と，タグ制御プログラムおよびメンテンス情報の更新（送信）を行う．特殊 IC タグとは無線による通信を条件としているので，筐体内部への無線モジュールを実装している．

PC に対しては USB インターフェースを経由して特殊 IC タグから取得したデータを送信する．

使用時の効率性を検討し，バッテリを内蔵させて可搬性を高めるものとした．充電は AC アダプタによって行う．

以下，これらの諸条件に従った RW の機能を示す．

・ 無線モジュールを介して特殊 IC タグと通信を行う．
・ USB インターフェースを備え，PC との通信を行う．
・ 表示機能および入力機能を備え，記録データを交換する．
・ 電源としてバッテリを備え，充電は AC アダプタ接続により行う．

今回は，設計期間短縮を図るため市販 PDA を活用し，表示機能と入力機能，USB インターフェース部の設計を省略した．

（b）ブロック図

Fig.5.5 に，RW のブロック図を示す．同図に基づき，各部の機能を説明する．

a）CPU

CPU は，特殊 IC タグに内蔵するものと同じ日立の H8S(HD64F2238R)を選定した．無線モジュール/PDA 間の通信制御を行う．

b）リセット IC

電源監視 IC としてミツミの PST597 を使用する．電源電圧が 2.7V でリセット解除をする．

c）無線モジュール

EPSON の S4E1672400 を使用する．CPU のポートを 4 本使い，送受信のデータ，クロックとして通信を行う．無線モジュールの受信通知用として SCLKOUT を IRQ1 に接続する．

d）RS232C トランシーバ

PDA と H8S 間シリアル通信に使用するため，レベル変換用 3.3V 対応 RS232C トランシーバ IC を使用する．

e）外部電源用端子

テスト/非常時用に電源端子を用意した．基板上の端子台を使用する．

f）DC-IN（充電用）

バッテリ充電用の DC-IN 端子を用意した．

g）外部／内部切換回路

外部電源端子と内部電源の切替えスイッチである．

h）充電コントロール回路，昇圧回路

充電用電圧の発生，定電流回路，ニカド電池供給電圧の 3.3V 安定化を行う．

i）ニカド電池

単三形ニカドを 2 個使用する．

j）PDA

PDA は COMPAQ 製 iPAQ3800 シリーズを想定している．主な仕様は，以下のとおりである．

・ディスプレイ：240×320 ピクセル，64K カラー
・プロセッサ：PXA250　400MHz
・メモリ：64MB SDRAM
・USB インターフェース

Fig.5.6 に，以上の設計に基づく RW の内部構造を示した．

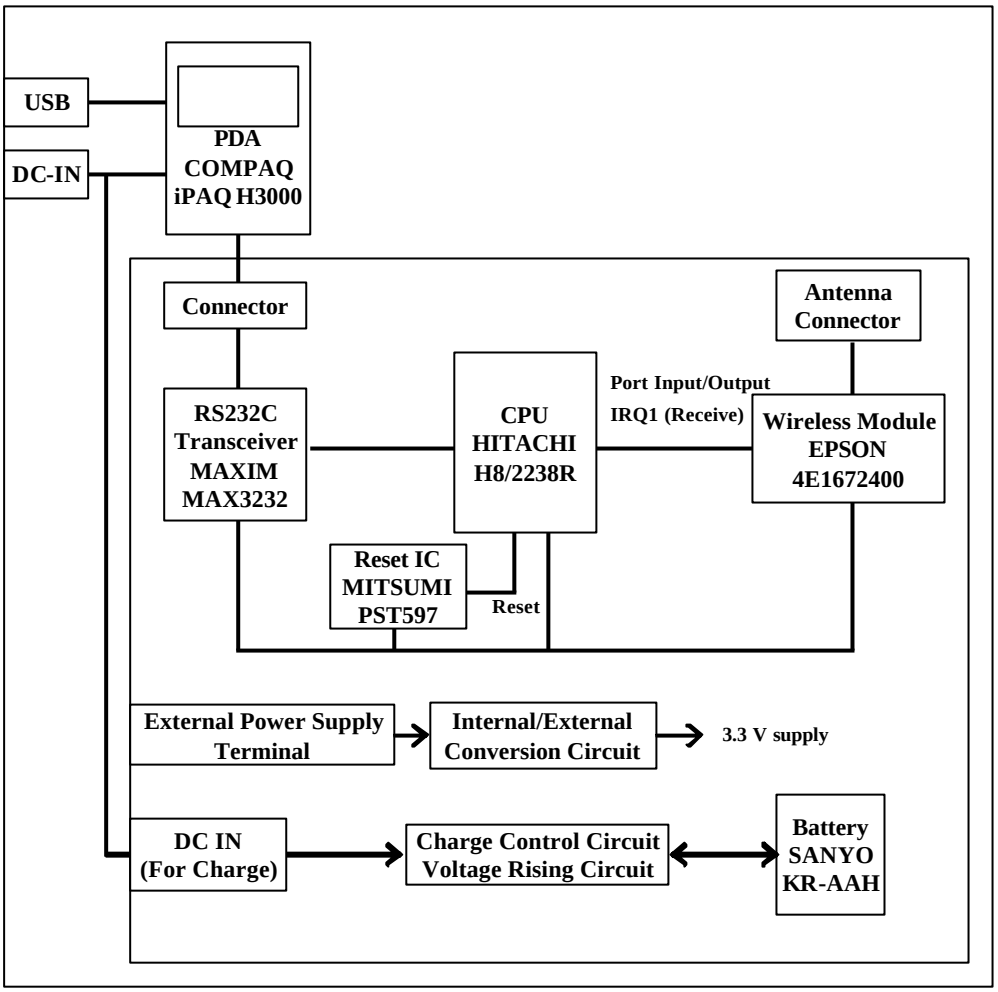


Fig.5.5 Block diagram of Reader/ Writer (RW)

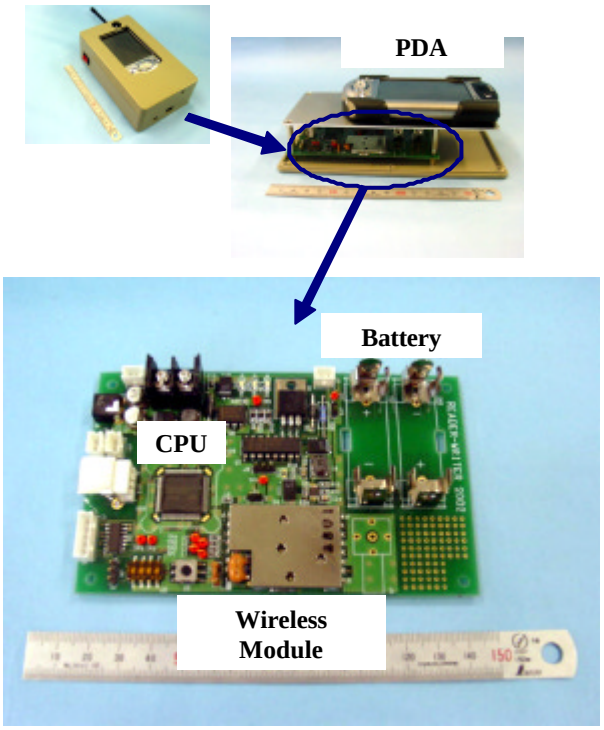


Fig.5.6 Structure of Reader/ Writer (RW)

（3）ソフトウェアの開発

前項までに設計した本システムの運用条件とハードウェア部の仕様に基づき，本システムを制御するソフトウェアプログラムを開発した．

（a）構成

Fig.5.7 にソフトウェアの構成図を示す．同図では，本研究での開発コンポーネントを識別表示している．開発対象は，本システム内の IC タグ制御，RW に組み込む無線/USB 制御，タグデータの入出力及び PC 側の USB 通信でのタグデータの入出力の機能である．

（b）概要

a）特殊 IC タグ部

ポンプ稼動時の運用情報の収集及びそのデータの送受信を行う．本研究における開発コンポーネントは，メイン制御，A/D 入力部，Flash アクセス部，無線制御部，データ管理部，電源制御・入出力全体制御，プログラム変更ツールの 6 種類となる．以下，各部の処理の概要を示す．

・A/D 入力部

温度，電流，4-20mA の取得処理を行い，電源制御・入出力全体制御に結果を通知する

・Flash アクセス部

FlashROM からのデータの取得及び各種情報の書き込み（更新）を行う．

・無線制御部

PDA からの情報の受信及び処理結果の送信を行う．

・データ管理部

Flash アクセス部への読み込み･書き込み要求及び運用情報データの更新を行う．

・電源制御・入出力全体制御

A/D 入力部，無線制御部，データ管理部の各機能の制御を行う．

・プログラム変更ツール

特殊 IC タグ部の制御プログラム更新の管理を行う．

b）RW 部

IC タグ部からのデータ取得,IC タグ部のプログラム変更及びメンテナンス情報の更新を行う．本試作版では，1000 ロット分のデータを保持できるものとする．本研究での開発コンポーネントは，無線 I/O ドライバ，無線 I/O ライブラリ，USB ライブラリ，データ送受信制御（制御アプリケーション），タグプログラム受信/送出ツールの 5 種類となる．以下，各部の処理の概要を示す．

・無線 I/O ドライバ

特殊 IC タグ部とのデータの送受信を行う．

・無線 I/O ライブラリ

無線 I/O ドライバの送受信を管理する．

・USB ライブラリ

USB ドライバを管理し，PC 部との送受信を行う．

・データ送受信制御（制御アプリケーション）

ユーザー・インターフェースを提供し，オペレーションにより IC タグとのデータの送受信，PC とのデータの送受信及び受信データの保存を行う．

・タグプログラム受信/送出ツール

特殊 IC タグ部の制御プログラム更新の管理を行う．

c）PC 部

RW 部からのメンテナンスデータの保存及び CSV ファイルの初期データ出力を行う．本研究での開発コンポーネントは，RW データ送受信プログラム，USB ライブラリの 2 種類となる．

・RW データ送受信プログラム

GUI を提供し，RW 部とのデータの送受信及び受信データの CSV 出力を行う．

・USB ライブラリ

USB ドライバを管理し，RW との送受信を行う．

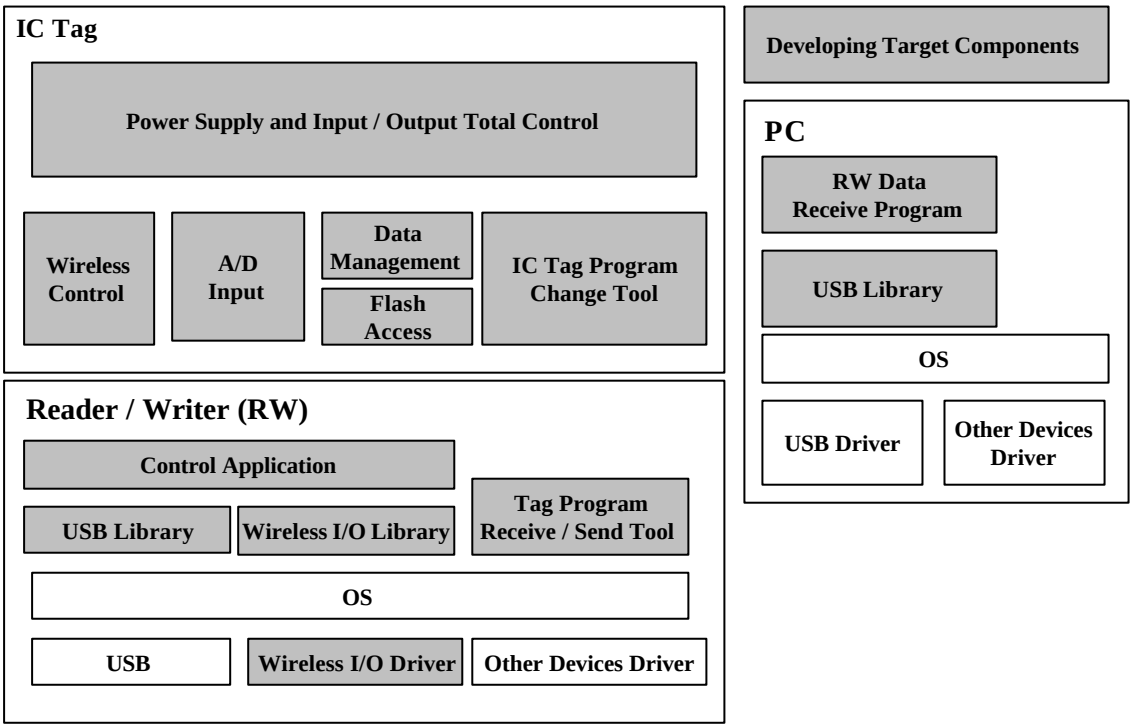


Fig.5.7 Structure of software

5．3　運用情報管理システムの有効性の検討

汎用ポンプをはじめとする汎用産業機器は，その運用実態が不明であることから必ずしも有効な運用管理がなされているとはいえず，結果的に多くの無駄を生み出している．メンテナンス事業や ESCO 事業をはじめ，使用済みポンプの再生販売事業においても，その運用状況や使用履歴に関する情報が得られず，各種の診断が非効率的となっているのが現状である．本研究開発における特殊 IC タグシステムでは，機器の運用情報を自動的に収集・蓄積可能となっているため，以上のような運用管理における問題点を解決することが可能である．

5．3．1　特殊 IC タグ記録情報の有用性

本システムの特長である特殊 IC タグに記録される運用情報に関して,その有用性を述べる．運転時間は，使用履歴を端的に表す情報であり，消耗品の交換時期の把握や，ライフサイクルにおける総運転時間を知る際に極めて重要である．また，起動停止回数の無理な繰り返しは，ポンプの寿命を縮める要因となる．したがって，起動停止回数をカウントすることで適切な運用が行われているか否かを判断することができる．

電流値は，式（5.1）に示すように，ポンプの負荷を意味する軸動力と密接な関係があり，電流値によってその運転状態を把握できる．とくに，負荷変動や過負荷運転点の有無を知る際に有用である．さらに，予め設定されたレンジごとの累積運転時間を記録可能となっているため，機器の負荷変動を容易に知ることができる．

$$So = ?_m P_i = \sqrt{3}VI\cos\Phi \qquad (5.1)$$

ここで，So：ポンプ軸動力[kW]　Pi：電動機入力[kW]
η_m：電動機効率[%]　V：電圧[V]
I：電流[A]　$\cos\phi$：力率

また，温度については，基本的に電動機表面の温度を記録することを想定している．電動機の温度上昇は，式（5.2）のようになるが [71]，電動機の絶縁劣化など異常時には，この温度が上昇するため，メンテナンスの観点から重要な情報となる．

$$? = ?_f\{1-\exp(-\frac{t}{t_h})\}$$

$$?_f = \frac{W}{hS} = \frac{(1-?_m)Pi}{hS} = \frac{Pi-So}{hS} \qquad (5.2)$$

$$t_h = \frac{Mc}{hS}$$

ここで，θ_f：一定になった後の室温からの温度上昇[℃]
W：損失[W]　S：冷却表面積[m^2]
τ_h：温度上昇の時定数[s]　h：熱放散係数[W/m^2・℃]
M：質量[kg]　c：比熱[J/kg・℃]

Fig.5.8 にポンプの電動機表面の温度上昇の例を示す．一定負荷で長時間運転した場合，同図に示すように指数関数的に温度が上昇する．

その他，特殊 IC タグは，4-20mA のインターフェースを 2 個有していることから，適宜記録情報を選択することが可能である．省エネ診断時に有用となる吐出圧力や流量などがその候補となる．

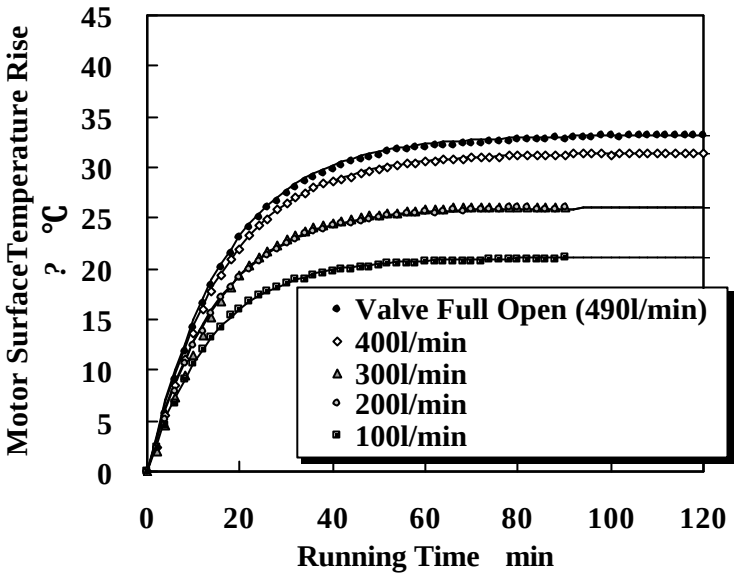


Fig.5.8 Pump's motor surface temperature rise
(Bore diameter: 50mm, Output: 1.5kW)

5．3．2　特殊 IC タグシステムによる省エネルギー診断の効率化

（1）データ収集の容易性

第 1 章で述べた汎用ポンプの省エネ診断に求められる要素は不変である．そのような観点からすると本システムの最も大きな特長は,「診断プロセスの簡易化」であると考える.

第 1 章で示した省エネ診断システムは，確かに流量計が不要であり，最小限の情報収集での診断が可能である．しかし，現場での実測診断を行わなければならないことに変わりはなく，実際，この「実測」のプロセスの負担が従来型システムにおいて最も労力を要するものとなっている.

また，実際の診断では，事前に診断対象となる設備（工場など）に導入されているポンプ全てをリストアップし，その中から省エネ診断対象とするポンプを抽出するという工程が存在する.これらのデータの収集でも現場によっては,相当な労力を必要とするのは明らかであり，また，診断結果に影響を与える運転時間などは，そのデータの信頼性に関しても問題がないとは言い切れない.

こうした観点からすると,特殊 IC タグの活用はこれらのプロセスの大幅な簡易化に寄与することは明らかである．Table 5.6 では，従来の省エネ診断システムを行う際に収集する情報の一覧と,本システムにおける特殊 IC タグへの記録の有無を併せて示しているが，省エネ診断に必要な情報の大半はタグに入力済みであることがわかる．とりわけ，機器の運転時間に関しては，実際の運転時間が蓄積されていることから実態に即した診断が可能となる.

さらに，運用情報の収集に関しても，非接触での読み出しが可能となっていることからデータ収集時の労力が軽減される.

Table 5.6 Necessary information for former energy saving diagnosis and Special IC Tag's information

Index	Necessary Information* for Former Energy Saving Diagnosis	Recording to Special IC Tag
Operating Condition	No.	○
	Place	―
	ITEM　No.	―
	Pump's Name	○
	Use (Cycling, Circulating, Lifting, Others)	―
	Running Time　hr/day、day/y	○
	Planned Specification (Q, H)	―
	Liquid Quality	―
	Liquid Temperature　℃	―
Pump's Information	Maker	―
	Type	○
	Serial No.	○
	Specification (Q, H, M)	○

* It means necessary information at the first step diagnosis (Outline diagnosis).

（2）運転パターンの把握

従来の省エネ診断システムは，流量が一定の循環用途にターゲットを絞っている．したがって，流量が時間的に変動する用途に対しては，適正回転数のシミュレーションは適用できない．また，流量が変動する場合には，その流量パターンを実測する必要があり，データの採取に時間を要する．先に述べたように，循環用途における省エネ効果が最も大きいのは事実であるが，診断システムとしては，様々なケースに対応可能であることが望ましい．

特殊 IC タグには，設定したレンジごとの累積運転時間が記録されるので，これらを読み出すことにより容易に運転パターンが把握可能である．

以上に述べたように，ポンプの運用状況を容易に把握できることが省エネ診断の効率化につながる．そこで，実際のポンプの運転をシミュレーションすることにより，特殊 IC タグ記録情報による運用状況が把握可能であるかを検証した．ここでは，一般集合住宅における給水におけるポンプの運転を想定した．Fig.5.9 **に BL 基準（優良住宅部品認定基準）による 1 日の給水変化の一例を示す．同図に示す給水率とは，1 日に消費する水量を 24 時間で割った値を 100%として，それを給水実態に合わせて時間ごとに振り分けたものである．洗濯を行う 10 時と夕食と入浴が重なる 19 時が 2 つのピークとなっている．**

また，ポンプの制御方式を高置水槽方式 [72] **と想定した．本方式では，建物の屋上に高置水槽を設け，水槽内の水位を電極棒で検知する．高置水槽内の水位が下がり始動水位になると，ポンプを始動させ，水槽に揚水する．また，高置水槽の水位が上がり，停止水位になるとポンプを停止する．水道使用者には，高置水槽からの自然流下により給水する．本方式では，受水槽から高置水槽までの配管抵抗，実揚程が一定であるから，使用水量とは無関係にポンプの運転水量は一定となる．すなわち，ポンプの最高効率点で運転できるため，省エネに貢献する．**

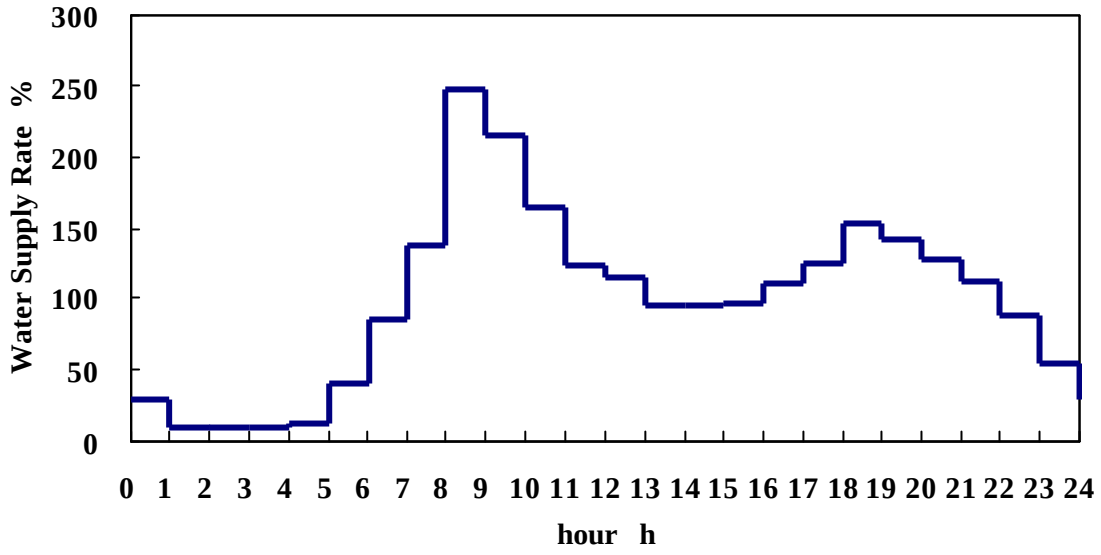


Fig.5.9 Water supply fate of a house

Fig.5.9 の給水を，A 社製ポンプ（吸込口径 50mm，定格出力 1.5kW）で実現することを想定して，運転時間，停止時間，起動停止回数の算出を行った．Table 5.7 に想定した条件を示す．高置水槽の有効水量を 1000 l，ポンプ運転水量を 300l/min，瞬時最大使用水量（Fig.5.9 における最大給水率 247%に相当）をパラメータとして，100，200，300 l/min と変化させた．以下，運転時間，停止時間，起動停止回数の算出方法を示す．

Table 5.7 Estimated Conditions at the Simulation

Pump	Bore diameter: 50mm, Output: 1.5kW
Control System	Elevated Tank System
Elevated Tank's Effective Volume Vav　l	1000
Pump Running Flow Rate Qp　l/min	300
Instant Maximum Use Flow Rate (Parameter) Qr　l/min	100, 200, 300

ポンプの運転水量が一定であることから，ポンプの運転時間 T_1 は，次式により求めることができる．

$$T_1 = \frac{Vav}{Qp - Qr} \tag{5.3}$$

ここで，Vav：高置水槽有効水量 [l]
Qp：ポンプ運転水量 [l/min]
Qr：使用水量 [l/min]

ポンプの停止時間 T_2 は，ポンプ停止水位よりポンプ起動水位に水位が変化す

る時間であるから，次式より算出される．

$$T_2 = \frac{Vav}{Qr} \tag{5.4}$$

高置水槽方式のように，断続運転する場合，T_1 と T_2 を求め，これを時間当たりになおすことで起動停止回数が求められる．

$$Nop = \frac{60}{T_1 + T_2} = \frac{60}{\frac{Vav}{Qp - Qr} + \frac{Vav}{Qr}} = \frac{60Qr(Qp - Qr)}{QpVav} \tag{5.5}$$

ここで，Nop：1 時間当たりの起動回数[回/h]

以上の式に，Table 5.7 で示した値を代入し，1 時間ごとに運転時間，停止時間，起動回数を算出することができる．

高置水槽方式では，運転水量が一定であるため，運転時の電流値の変動はない．したがって，ここでは電動機表面温度のシミュレーション方法を述べる．

シミュレーションは 1 起動ごとの運転で行い，まず起動時の温度 T_{st} から停止時の温度 T_{st} に達するまでの時間 t_{st} を次式より算出する．このとき，最高到達温度 T_f，時定数 t_h は，Fig.5.8 に示したように運転点一定で，ポンプを長時間運転した実験（以下，定常運転試験という）によって得られた値を用い，最高到達温度は，周囲温度によって異なってくるので，ここでは周囲温度からの上昇分 θ で整理することにする．

$$t_{st} = t_h \ln\left(\frac{\theta_f}{T_f - T_{st}}\right) \tag{5.6}$$

ここで，t_{st}：定常運転試験時に起動時の温度に達するまでの時間 [min]

T_f：最終到達温度 [℃]

T_{st}：起動時の温度 [℃]

θ_f：最終温度上昇 [℃]

τ_h：該当運転水量時の時定数 [℃]

ポンプの運転時には，それ以降の温度変化が定常運転試験と同様の挙動を示すことを想定してシミュレーションを行う．起動開始からの経過時間 t を変数として 1min ごとに変化させ，上式で求めた t_{st} を下式に代入して温度上昇 θ を求められる．それによって起動開始からの経過時間 t min 後の温度が算出可能となる．

$$\theta = \theta_f\{1 - \exp\left(\frac{t_{st} + t}{t_h}\right)\}$$
$$T = \theta + T_a \tag{5.7}$$

ここで，t：起動開始からの経過時間 [min]

θ：t min 後の温度上昇 [℃]

T：t min 後の温度 [℃]

T_a：周囲温度 [℃]

一方，停止時の温度変化のシミュレーションは，放熱時の熱バランスから容

易に算出可能である．すなわち，

$$-McdT = hS(T - T_a) \tag{5.8}$$

より

$$\theta = (T_{sp} - T_a)\{\exp(-\frac{hS}{Mc}t)\}$$
$$T = \theta + T_a \tag{5.9}$$

ここで，T_{sp}：停止時の温度 [℃]　　T_a：周囲温度 [℃]

M：冷却表面部質量 [kg]　　S：冷却表面積 [m^2]

c：比熱 [J/kg・℃]　　h：熱放散係数 [W/m^2・℃]

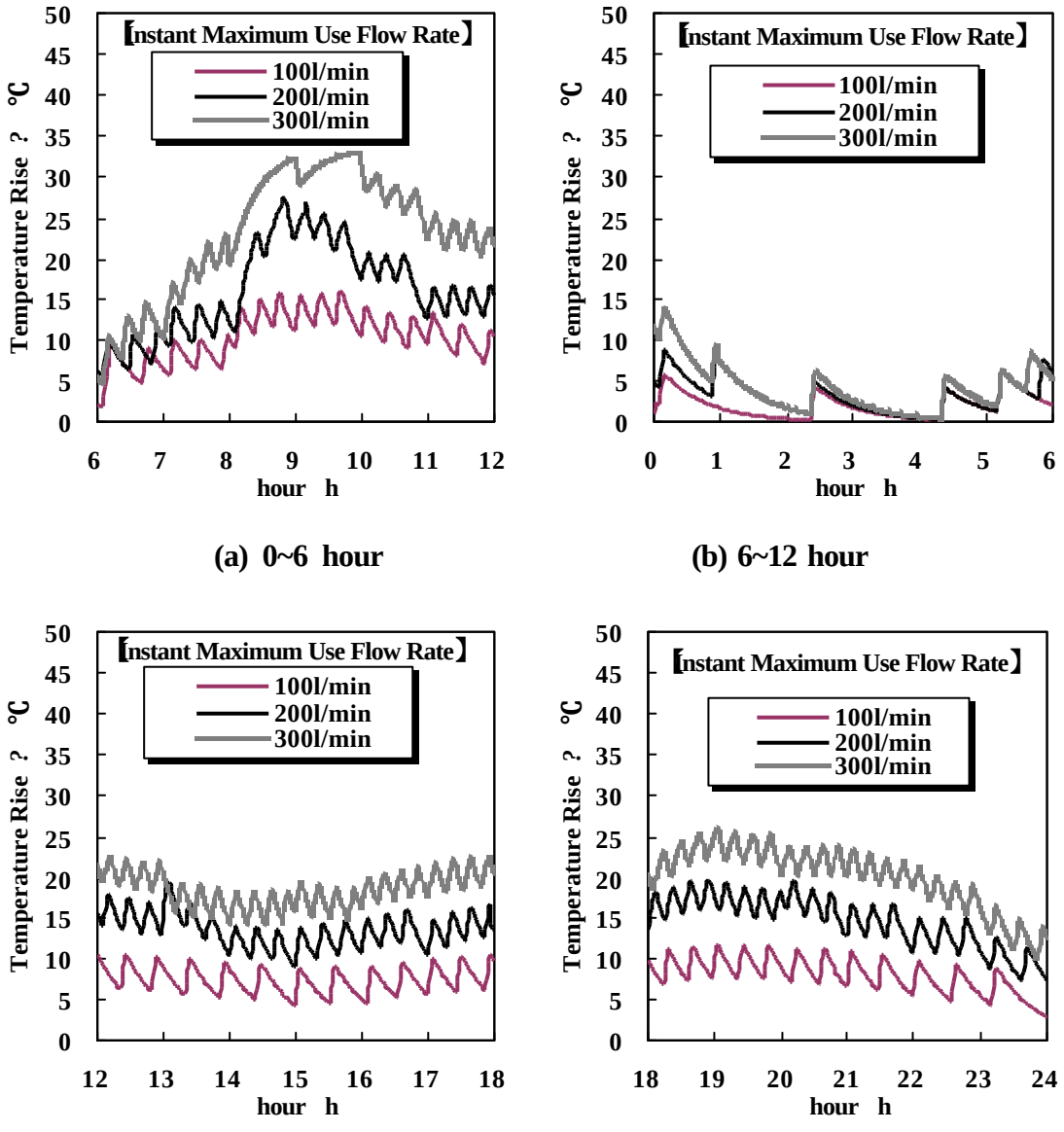
以上の前提条件をもとに，Fig.5.10 に，1 日あたりの温度変化のシミュレーション結果を示す．Table 5.8 に想定した条件を再掲する．図からもわかるように，パラメータの違いによる温度上昇の違いが明確に現れている．Fig.5.11 は，特殊 IC タグによるデータの蓄積を想定し，温度上昇，電流にレンジを設定し，各レンジにおける継続時間で整理したものである．特殊 IC タグには，停止時間はカウントされないが，同図では，傾向把握を目的としているので，停止時間も含めて継続時間を示している．温度上昇のピークが，瞬時最大使用水量の違いにより，異なってくることがわかる．このピークが，高温側にいくほど電動機への負荷が高いということがいえる．電流に関しては，同一水量での運転を想定しているのでレンジの違いは現れていないが，パラメータの違いにより運転時間が異なってくるので，継続時間で運転状況が把握可能であるといえる．

実際に特殊 IC タグにより，ポンプの運用情報を収集し，同図のように表現することにより，運転状況に対するアドバイスを行うことが可能である．今回想定した条件は，正常運転の範囲内であるが，例えば，温度上昇のピークがより高温側にあった場合には，容量の大きいポンプに交換を行うことにより，結果的に適切な運用がなされると考える．

また，こうした情報は，機器の負荷変動を意味することに他ならず，省エネルギー診断を行う上で極めて有用な情報となる．

Table 5.8 Estimated conditions at the simulation

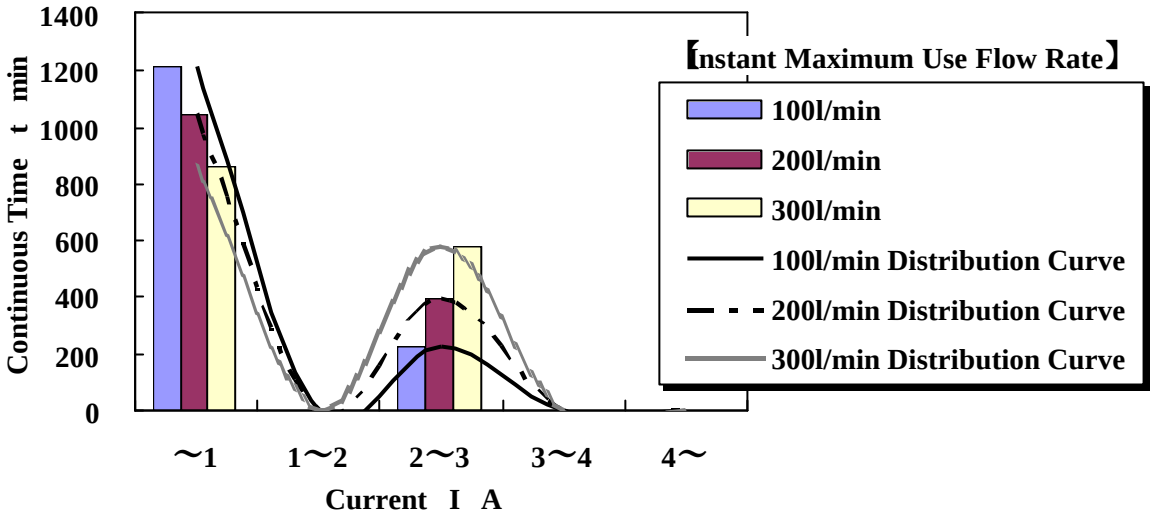
Pump	Bore diameter: 50mm, Output: 1.5kW
Control System	Elevated Tank System
Elevated Tank's Effective Volume Vav　l	1000
Pump Running Flow Rate Qp　l/min	300
Instant Maximum Use Flow Rate (Parameter) Qr　l/min	100, 200, 300



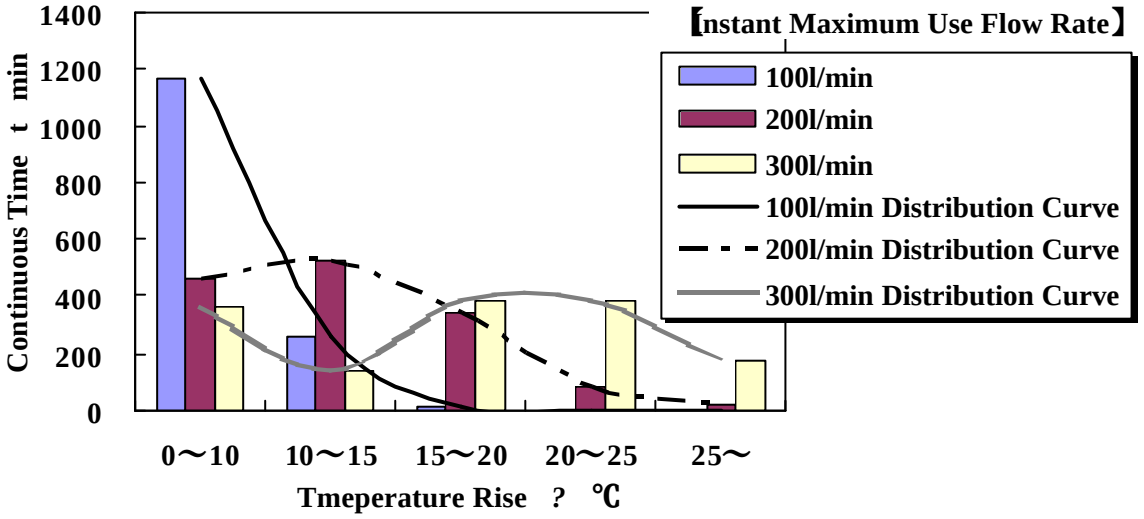
(a) 0~6 hour　(b) 6~12 hour

(c) 12~18 hour　(d) 18~24 hour

Fig.5.10 Result of temperature simulation
(Parameter: Instant Maximum Use Flow Rate)



(a) Current



(b) Temperature

Fig.5.11 Result of simulation supposed the recording by Special IC Tag (Running time for respective range)

（3）メンテナンス業務の簡便化

メンテナンス業務が軽減化されることも大きな特長である．具体的には，以下のような点が挙げられる．

- 消耗部品（軸受，メーカーニカルシール等）の適切な交換時期の推定が可能（運転時間と消耗部品の標準寿命から）
- 予知保全機能（電流，温度などによる診断が可能）
- 故障発生時に，運転履歴から故障原因の特定が容易となる．

以上の点は，結果的にエネルギーの無駄をなくすことに寄与すると考える．

5．3．3　性能劣化・故障状態の検知における有効性の検討

ポンプの使用・運用段階において，性能劣化や異常状態を的確に検知し，適切なメンテナンスなどを行うことは，製品の長寿命化や省エネルギー化に大きく貢献するものである．しかしながら，省エネ診断とは異なり，その診断プロセスは明確に決定されていない．そこで，劣化状態や異常状態を実験的に再現し，その影響が IC タグ記録情報，とりわけ電流や温度に反映されるかを検討し，運用情報を収集・蓄積することにより，劣化・故障診断が可能であることを示す．試験は，Table 2.9 に試験対象ポンプの仕様を示す．A 社製の片吸込渦巻きポンプ（吸込口径 50mm，定格出力 1.5kW）を対象とした．

Tale 5.9 Specification ofexperimental pump

Bore diameter　mm	50
Output　kW	1.5
Flow Rate　m^3/min	0.312
Total Head　m	15.0

（1）性能劣化試験

ポンプの性能劣化を招く要因としては，羽根車や軸受の摩耗や錆びなど様々なものがある．劣化状態でポンプの運転を継続することは，ポンプの効率の低下を招くだけでなく，上述した様々な劣化を誘発することから，消耗部品の適切な交換などにより対策を施すことが重要である．それら全てを想定して実験を行うことは困難なので，試験対象ポンプにおいて，羽根車とライナリングのしゅう動部分の隙間が増大することによる生じる循環損失を想定して実験を行った．Fig.5.12 に示すように，羽根車側のしゅう動部分を旋盤により削ることで摩耗を再現し，実験を行った．削り幅は，直径値で 0.5，1.0mm の 2 通りで行った．これは，すなわち，しゅう動部分の隙間がそれぞれ，0.5，1.0mm であることは意味する．A 社によると，メンテナンス時に該当隙間が 1.0mm 以上であると羽根車，ライナリングを交換するということであり，それを参考に実験条件を設定した．各条件において，性能試験，定常運転試験を行い，正常運転時との比較を行うことにより，劣化の影響が特殊 IC タグ記録情報に反映されるかを検討した．以下，その結果について述べる．

Fig.5.13 に性能劣化試験における各種性能値を正常運転時と比較して示す．性能低下の傾向が現れているといえる．なお，本実験では，循環損失のみを想定しているので摩耗により軸動力が低下する傾向がみられる．Fig.5.14 は，性能劣化試験における特殊 IC タグ記録情報と流量の関係を示したものである．同図(a)に示す電流値については，先に述べたとおり軸動力と密接な関係があるので，同様な傾向を示していることがわかる．

また，同図(b)は電動機の温度上昇が次式のように，電動機損失に比例すると仮定して算出した計算値である．

$$?_f = \frac{W}{hS} = k\,W$$
$$k = \frac{1}{hS} \qquad (5.10)$$

ここで，θ_f：最終温度上昇[℃]　　W：電動機損失[kW]
h：熱放散係数[W/m^2]　　S：冷却部表面積[m^2]
k：温度上昇の比例定数[℃/W]

ここで，比例定数 k は，全実験条件の平均値から算出した値を採用している．この値が一定であると仮定しているので軸動力や電流値と同様な傾向を示していることがわかる．また，Fig.5.15 は，温度上昇が Fig.5.14(b)のように変化すると仮定した場合の各運転点における電流と温度上昇の関係を示したものである．ここでは，比例定数 k を一定としたが，温度上昇は周囲の状況，とりわけ熱放散係数 h に大きく影響される．したがって，単発的な測定では，このような傾向が得られない．しかし，特殊 IC タグには継続的に情報が収集・記録されることを考慮すると，図の矢印の方向にプロットが移動する傾向が見られ，劣化状況が把握できると考える．
なお，ここでは，循環損失のみを想定して実験を行ったので電流値が摩耗によって低下する傾向が見られるが，軸受の摩耗や電動機の効率の低下などその他考えられる摩耗は，軸動力の増加，すなわち，電流値及び温度上昇の増加を招くものである．いずれにしても，性能劣化の傾向は，特殊 IC タグ記録情報に反映されるといえる．

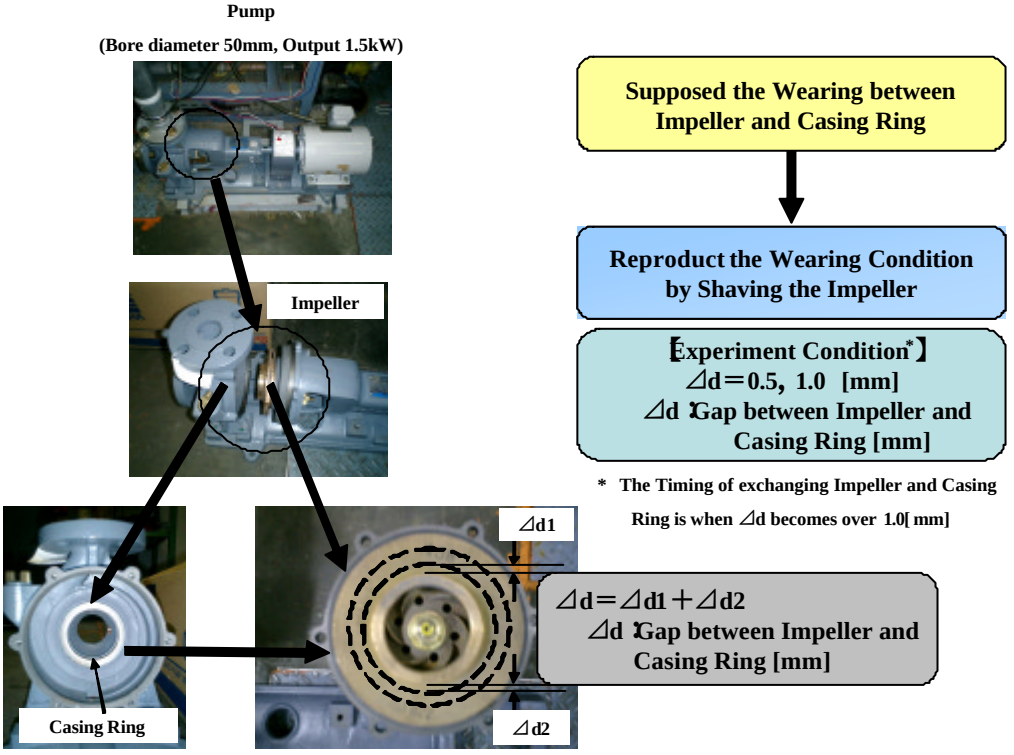
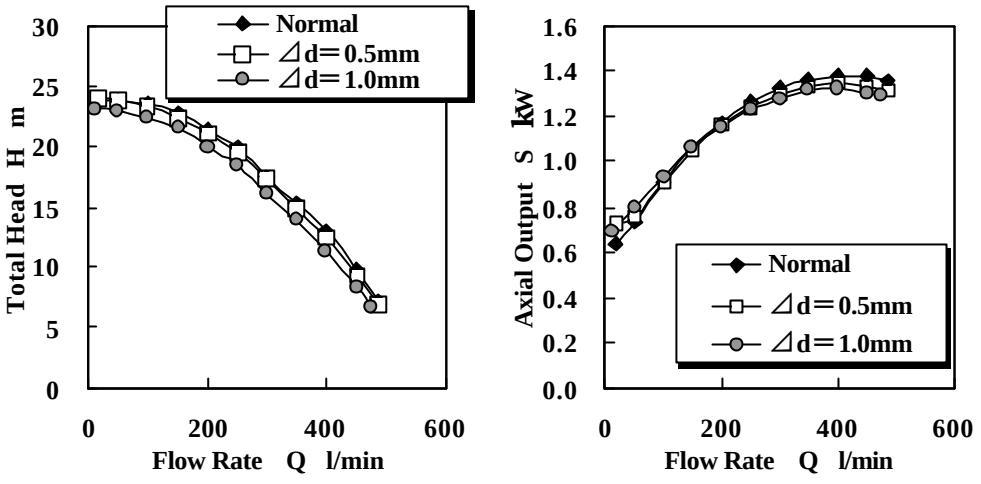
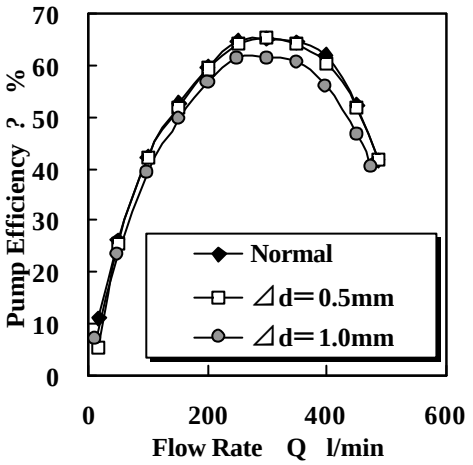


Fig.5.12 Outline of performance degradation experiment

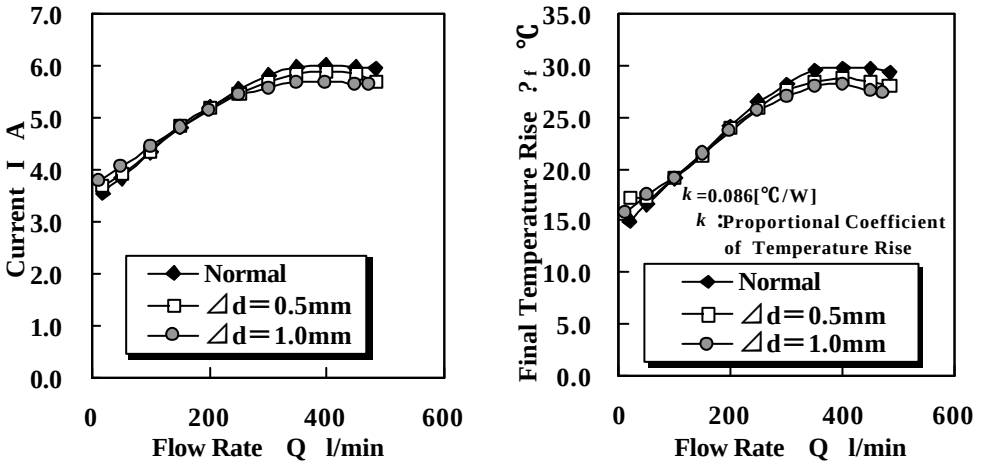


(a) Total head　　(b) Axial output



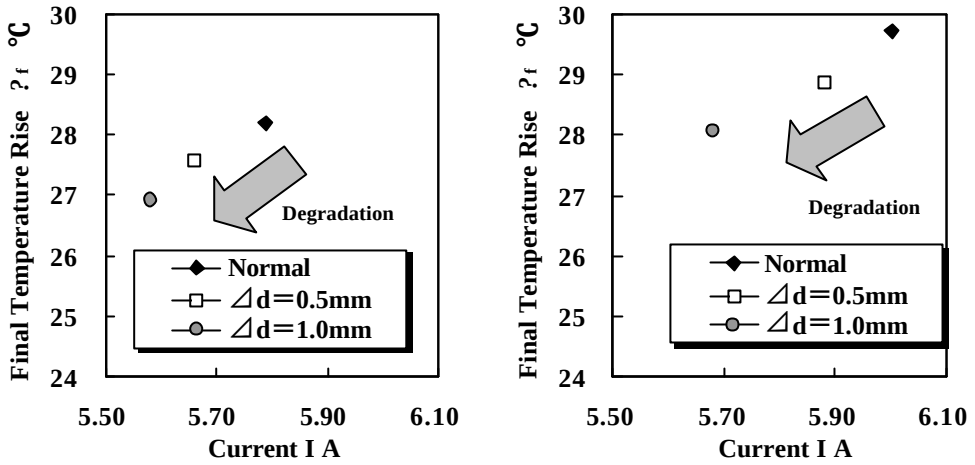
(c) Pump efficiency

Fig.5.13 Result of performance degradation experiment as principal performance index



(a) Current　　(b) Final Temperature Rise (Calculated)

Fig.5.14 Result of performance degradation experiment as Special IC Tag recording information



(a) 300 l/min　　(b) 400 l/min

Fig.5.15 Relation between current and final temperature rise

（2）異常運転試験

性能劣化試験と同じポンプを対象として同様の試験を行った．異常状態として，ポンプ主軸と電動機軸の軸芯のずれを想定した．Fig.5.16 **に本実験の概要を示す．図に示すように，軸芯を鉛直方向にずらすことによって異常状態を再現した．試験対象ポンプの取扱説明書には，このずれを** 0.05mm **以内とするように記されている．軸芯のずれを正確に設定することは困難なのでおおよその目安をつけ軸芯をずらし，そのずれを後で測定することによりパラメータとした．軸芯のずれは，**0.45，0.86，1.23mm **の条件で実験を行った．**

Fig.5.17 **に実験結果を示す．大幅な変化は見られないが，軸動力が軸芯のずれとともに増大する傾向が観られる．**Fig.5.18 **は，異常運転時の特殊** IC **タグ記録情報を示している．最終温度上昇は，式(**5.10**)により，電動機損失に比例するとして算出した計算値であるが，電流値も併せて考慮すると，異常状態が特殊** IC **タグ記録情報に反映されていることがわかる．以上の点から，劣化傾向と同様に，異常状態も正常運転時の値と対比されることにより把握が可能であることが確認された．**

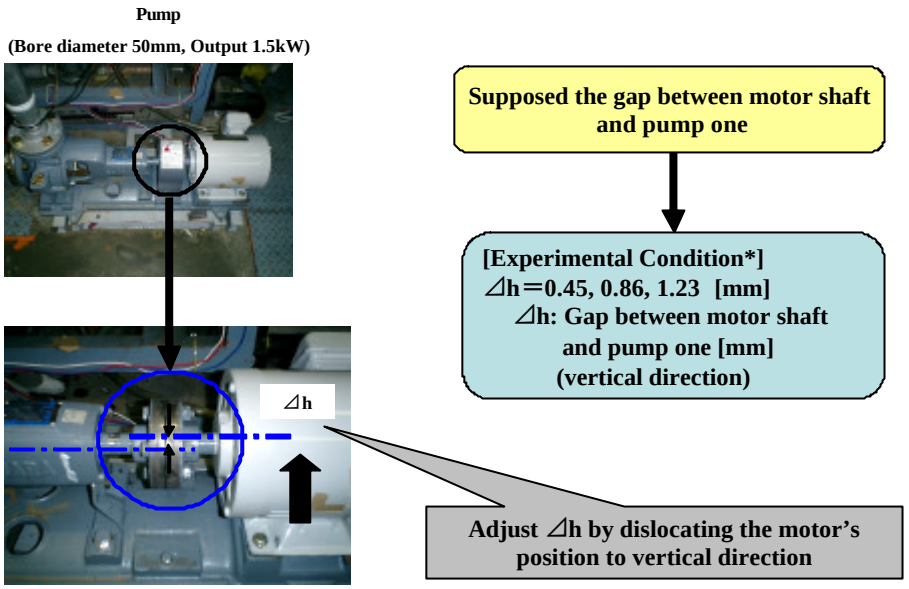
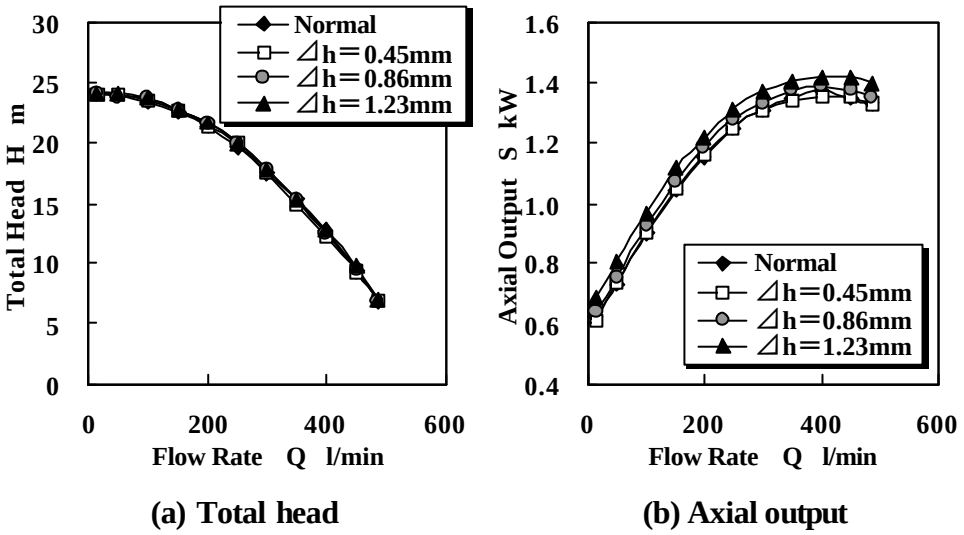

Pump
(Bore diameter 50mm, Output 1.5kW)
Supposed the gap between motor shaft and pump one
[Experimental Condition*]
⊿h＝0.45, 0.86, 1.23 [mm]
⊿h: Gap between motor shaft and pump one [mm] (vertical direction)
⊿h
Adjust ⊿h by dislocating the motor's position to vertical direction

Fig.5.16 Outline of disorder running experiment



(a) Total head　　**(b) Axial output**

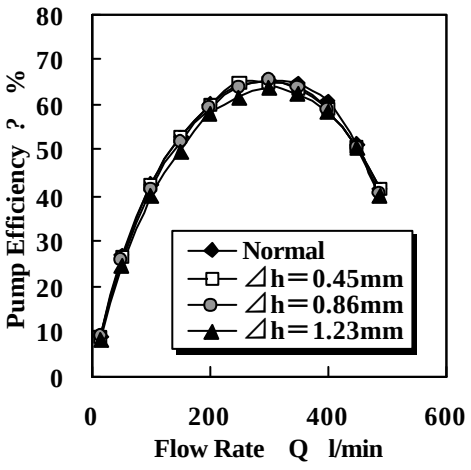


Fig.5.17 Result of disorder running experiment as principal performance index

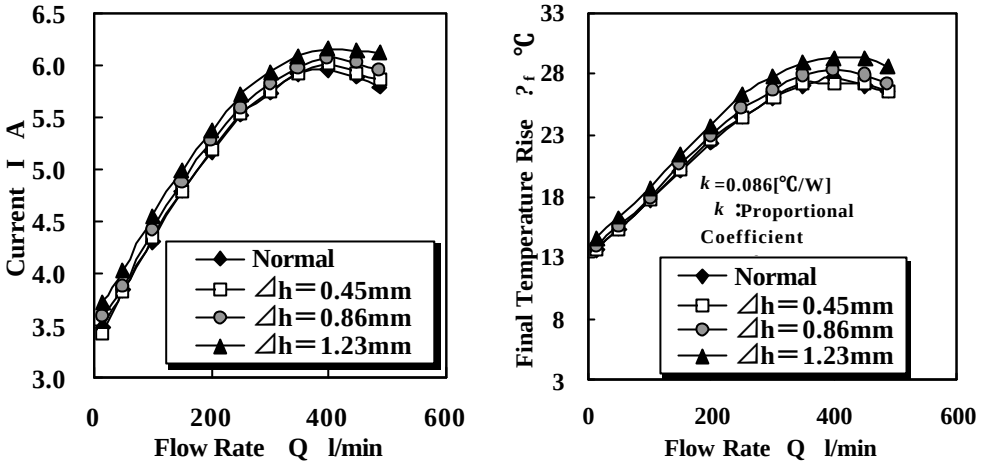


Fig.5.18 Result of disorder running experiment as Special IC Tag recording information

5．3．4　使用履歴の予測における有効性の検討

特殊 IC タグ記録情報は，省エネ診断や劣化・異常状態の検知にとどまらず，対象機器のライフサイクルにわたる使用履歴を予測する際にも有用である．その具体的な検討事例を A 社 B 工場において，試作した特殊 IC タグを実際に取り付けることにより行ったフィールド試験結果を例に示す．

（1）試験対象のポンプ

A 社 B 工場敷地内に設置されたポンプを対象とした．Table 5.10 に仕様を示す．いずれもクーリングタワー用のポンプであり，インバータ付き電動機が取り付けられている．

Tale 5.10 Specification of experimental pump (running record estimation test)

Production year	1994
Bore diameter　mm	65
Output　kW	5.5
Flow Rate　m^3/min	0.600
Total Head　m	32.5
Note	With invertor

（2）試験方法

2003 年 11 月下旬にタグの該当ポンプへの取り付けを行い，12 月上旬より試験を開始した．ここでは，電流値に着目した検討を行った．各レンジの設定は，定格出力から推測し，評価対象ポンプの運転パターンを特殊 IC タグの試験的な取り付けや現場に設置された圧力計の値を参考にしながら適宜行った．設定したレンジを Table 5.11 に示す．クーリングタワー用であるため，ポンプはほぼ一定の負荷で運転する．したがって，電流に関しては，運転点近傍で細かく分割してレンジを設定した．

Tale 5.11 Setting of Special IC Tag current range in the test

Information		Current　A
Range	1	0〜16
	2	16〜17
	3	17〜18
	4	18〜19
	5	19〜20

（3）試験結果

（a）1 日単位の運転パターン

12 月の初旬から試験的なデータの記録を行ったが，タグのレンジ設定を明確にし，正式に記録を開始したのは，12 月 8 日からである．Table 5.12 **に 12 月 8 日及び 9 日に取得したデータを示す．同表における 8 日のデータは，タグの取り付けを行い，しばらく放置した後に取得したデータである．9 日のデータは，8 日とほぼ同時刻（**A.M.10:00 **頃）に取得したものである．厳密な値とはいえないが，1 日で運転時間が約 9 時間増加していることがわかる．また，起動停止回数は，1 日に 1 回あるいは 2 回で，1 回の起動あたりの運転時間が長い運転パターンであることを容易に知ることができる．**Fig.5.19 **に 12 月 9 日に取得した電流について各レンジの運転対応時間を示す．同図から，一定の運転点で使用される用途であることが確認できる．運転時間や起動停止回数に関しては，後により詳細な検討を行うが 1 日分のデータからだけでも運転状況の把握が可能であるといえる．**

Tale 5.12 Recorded operating information on Special IC Tag

Date	Running Time min	Boot Frequency Times	Current (Maximum) A	Current (Present) A	Current (Minimum) A
Dec.8, 2003	24	1	18.55	18.32	3.47
Dec.9, 2003	550	3	18.94	18.08	3.47

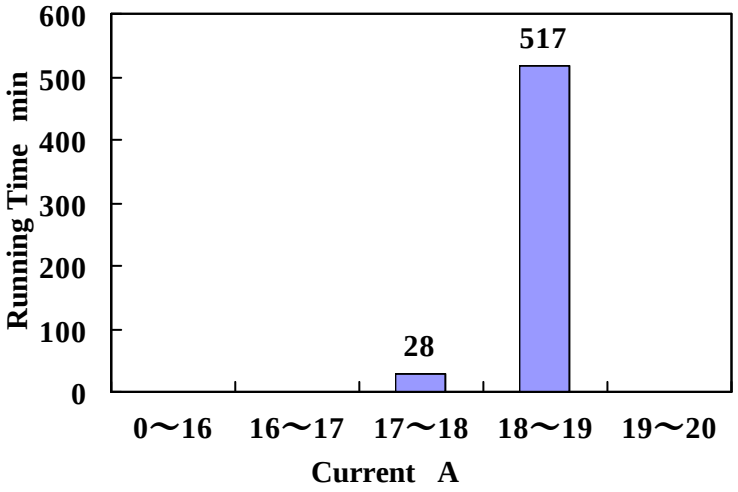


Fig. 5.19 Running time of respective current range (acquired on Dec.9, 2003)

(b) 各レンジ対応運転時間の累積

Table 5.13 は，12 月 8 日から 18 日かけて取得した運転時間，起動停止回数，電流に関する各レンジの対応運転時間を示したものである．土日を挟んでいる関係上，毎日のデータを取得することはできなかった．Fig.5.20 には，電流値の各レンジ対応運転時間をデータ取得日ごとに図示した．このように，記録データが随時蓄積されることが確認できた.

Tale 5.13 Recorded operating information on Special IC Tag after 10 days run

Date*1 (2003)*1	Running time min	Boot frequency Times	Current A			Running time of respective current range min				
			Mas	Present	Minimum	1	2	3	4	5
						0～16A	16～17A	17～18A	18～19A	19～20A
Dec.8, Mon.	15	1	18.55	18.32	3.47	0	0	0	14	0
Dec.9,Tue.	549	2	18.94	18.08	3.47	0	0	28	517	0
Dec.10,Wed.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dec.11, Thu.	1838	4	18.94	18.67	3.47	0	0	49	1785	0
Dec.12, Fri.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dec.13, Sat.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dec.14, Sun.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dec.15, Mon.	3865	7	19.38	18.08	3.47	0	0	123	3737	0
Dec.16, Tue.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dec.17,Wed.	5176	9	19.38	18.35	3.47	0	0	180	4990	0
Dec.18, Thu.	5943	10	19.38	18.08	3.47	0	0	205	5731	0

*1　Data acquisition was done during .M10:00～P.M1:00.
*2　“－” means data acquisition was not done.

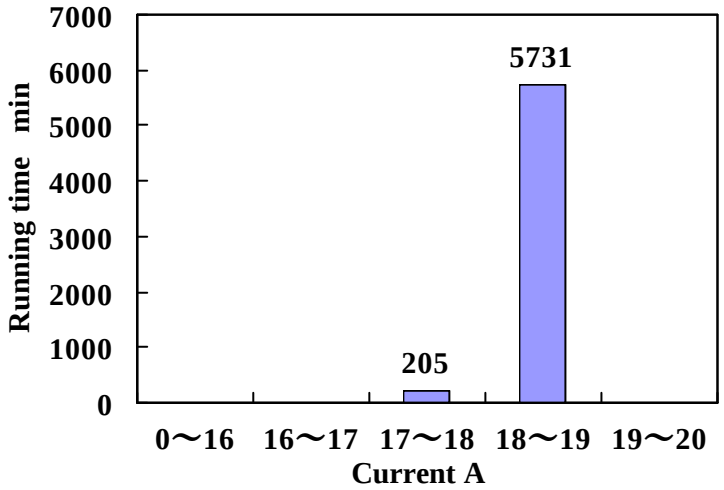


Fig.5.20 Running time of respective current range after 10 days run

(4) 考察

以上の記録データをもとに，使用履歴予測診断のケーススタディを試みた．使用履歴を予測するにあたり，重要な情報は，「運転時間」及び「起動停止回数」である.

Table 5.13 の結果から，起動停止回数は，１日あたり１回であることがわかる．また，12 月 12 日（金）～14 日（日）の 3 日間で 2 回起動停止回数が増えていることから，評価対象のポンプは，土曜日にも稼動していると推測できる.

すなわち，データ取得を行った週に関していえば，週 6 日間，ポンプが稼動していることになる（起動停止回数は，6[回/week]）．ここでは，この運転パターンが標準であると仮定する．

次に，運転時間をみると，12 月 18 日（木）の時点の累積値が，5943[min]となっているから，1 起動あたりの運転時間は，

5943[min]÷10[回]=594.3[min/回]=9.90[h/回]

となる．1 日 1 回起動するので，これは，1 日あたりの平均運転時間と同値である．すなわち，

9.90[h/回]×1[回/day]=9.90[h/day]

これらの情報は，ESCO 事業における省エネ診断時のデータ収集に有用であるだけでなく，概算を行うことによって，評価対象サンプルのライフサイクルあたりに拡張した形での総運転時間を類推することが可能である．

本試験の評価対象機種の製造年は，1994 年である．単純に現在まで，9 年間同じ条件で稼動しているとし，1 年間を 52 週間として計算すると，評価対象サンプルの推定の累積運転時間は，

9.90[h/回]×6[回/week]×52[week/year]×9[year]=27813[hour]

また，起動停止回数は，

6[回/week]×52[week/year]×9[year]=2808[回]

と概算できる．使用済みポンプの再生販売事業におけるリユースかリサイクルかの判断基準としては，これだけの情報が得られれば分別工程の効率化が可能であると考える．

運転時間及び起動停止回数による運用管理については，その他に次のような活用方法が考えられる．

1）消耗品の交換の時期の把握

メカニカルシール，軸受などの消耗品の交換時期の目安は，取扱説明書に記されている．運転時間を正確に知ることにより，こうした交換作業を効率的に行うことが可能となる．

2）起動停止回数による適正な運用管理

1）と同様，起動停止回数についても取扱説明書に記されている．こうした基準を越えるような起動停止を繰り返している場合には，注意が必要である．なお，今回評価対象としたポンプについては，1 日 1 回の起動であるので，こうした基準を十分満たしていると判断できる．

5．3．5　運用情報管理ソフトウェアの開発

これまで述べてきたように，運用状況の判断を行うにあたって，経験的な根拠によるもの，長期的な情報蓄積による傾向分析，経年変化の観察が少なからず必要である．ここでは，こうした長期的な情報蓄積を可能とする，運用情報管理ツールについて述べる．

本研究では，収集データの効率的な蓄積と圧縮手法について検討し，長期的な蓄積データを傾向分析が可能な形に効率よく圧縮する集計ソフトウェアを開発する．

本ソフトウェアの開発にあたっては，今後の省エネ診断あるいは余寿命診断が，様々な利用環境での対応を想定し，可能な限り，細かな情報収集が出来るよう配慮した．現時点では特殊 IC タグへの情報蓄積のタイミングを，RW への情報送受信時としており，抽出データの蓄積時間のばらつきが存在している．そこで，これを均一なデータとして蓄積するために，抽出データを規定の最少単位で分割することで整理し，様々な傾向データ抽出に耐えるよう整理することとした．さらに，蓄積の規定最小単位を 1 時間と 10 分の２つの別なソフトウェアを作成し，長期の測定に対応するものと短期の詳細データの収集に対応するものとする．

また，同時に将来的なデータの蓄積方針として，情報収集対象の増大に伴う蓄積データの膨大化を防ぐ手だてとして，過去のデータを傾向データごとに平均化し，圧縮蓄積する指針を示すこととする．

（1）長期運用データの蓄積

長期にわたる運用データの蓄積に際し，経年的なデータ蓄積を目的として，最小単位として 1 時間ごとのデータ取得を行うものとする．ただし，データの取得のタイミングが,診断によって異なることが想定されるため,取得の度に，取得数値を平均化して 1 時間ごとのデータに分割して収納する．例えば，1 日に 1 回取得したデータは，24 分割され，1 時間ごとに平均化した形で収納される．また，1 年に 1 回，取得した場合でも 24 時間×365 日に分割した形で収納される．

よって，取得間隔が短ければ短いほど正確な傾向が観られるが，傾向として日ごと，曜日ごとの傾向を知りたい場合は，最低でも 1 日 1 回以上の計測が必要になる．また，月ごとの傾向が知りたいときは月に１度以上の計測が必要であるが，その回数が増えるほど平均化による誤差が減少することになる．

また，機器の停止期間が明らかな場合は，停止時期を手入力することにより，単純に平均することの誤差を解除することができる．

（2）短期運用データの蓄積

長期的な測定手法に対して，より詳細に運転状況を調査する場合，短期的な測定手法を用いる．長期的な測定方法に対して，最少時間単位が 6 分に 1 の 10 分に規定されている（平均化の手法は同様である）．これにより 1 日の運転状況の推移を詳細に記録することが出来る．

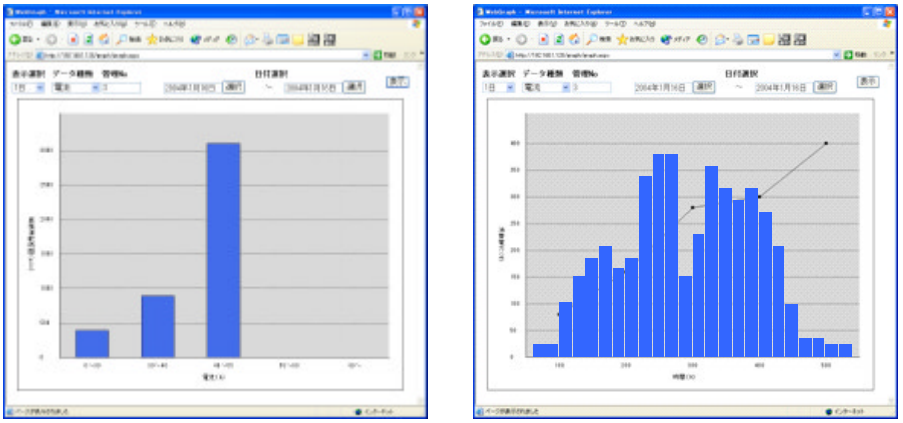
また，データ分析の必要性に対応した一時的な短期運用データの取得を可能とし，長期運用データ保存と併存することは可能である．しかし，現時点ではデータ取得方法に違いがあるため合算が可能な仕様としはしていない．

（3）傾向分析ツール

傾向の表示は 2 パターンを基本とし，消費電力等の 24 時間における時間推移を示すものと，各レンジに対応した 1 日あたりの累積運転時間を示すものである．

それぞれの数値はある特定の 1 日を示すほか，特定の期間データを直接比較できるように，累積値でなく平均化して 1 日あたりの値として示す．また，情報によってはある一定の期間の月ごと，曜日ごとの傾向データを示すことが可

能である．ただし，短期運用データに関しては，1 日ごとのデータ表示のみとする．こうした傾向分析のための基礎データは，過去 1 年分を最少単位の 1 時間ごとのデータで保存し，細かい期間ごとの傾向表示に対応させている（短期運用データは必要に応じて保存）．さらに，1 年後には月ごと曜日ごとの傾向データとして集計した上で保存することとし，データを 20 分の 1 程度に圧縮するものとする．傾向分析ツールの画面表示の例を Fig.5.21 に示す．



(a) Running time of respective range　(b) The load change per hour

Fig.5.21 Data output image of “Operating Information Management Software”

5．4　自動販売機の運用の高度化

運用情報管理システムは，汎用産業機器のみならず他の製品への応用も期待できる．その一例として自動販売機（以下，自販機という）への適用事例を示す．製品の省エネルギー化が求められている情勢の中で，自販機においては，学習省エネ機能の搭載やピークカット運転，断熱材の改良など各種の省エネ対策の導入がなされてきており，その結果，JIS 規格に基づく試験によれば，自動販売機の消費電力量は，ここ 10 年間で 60%を越える削減率を実現している．しかし，その一方で，自販機の実際のオペレーションにおいては，消費電力量が設置環境によって大きく変動することに加え，各種の設定変更を必要とする照明の点灯時間の変更等の省エネ機能がオペレーターによって十分に活用されていない，あるいは，深夜停止やピークカットなどの発現頻度が不定期であり，結果的に無駄なエネルギーを消費している実態が存在することが，本研究により明らかになった．本項では，自販機の稼動状況が特殊 IC タグの記録情報により把握可能であることを示すとともに，その運用情報に基づいた省エネルギー診断，環境効率性の評価が可能であることを示す．さらに，ロケーション全体（例えば，大学構内，工場内等）を総合的に評価することによって，配置の適正化を支援することが可能となる．以上のように，運用情報管理を出発点として，自販機の運用の高度化に資する提案を行うことを目的とする．

なお，調査対象とした自販機は，早稲田大学大久保キャンパス（以下，大久保キャンパスという）に設置されている 29 台の自販機とした．自販機の一覧を Table 5.14 に示す．本研究では，同表に示すように，各自販機を 14 のロケー

ションに分類し，No.によって，各自販機を識別する．「ラウンジ(Lounge)」，「購買部前(In front of the compony store)」，「生協入口(Undergoround entrance of 57 building)」などは人通りの多い場所であるのに対し，「憩いの広場(Open space “ikoi”)」，「54 号館階段下(Underground of 54 building)」などはあまり人が通らない場所でありと様々な環境に設置されている．

Table 5.14 Classification of the location and vending machines on Okubo campus of Waseda University

Location	Number of vending machines	No.
Open space “Ikoi”	7 (Can: 4, Cup: 2, Pack: 1)	1~7
Teacher’s lobby	1 (Cup)	8
Lounge	3 (Can: 2, Pack: 1)	9~11
Underground of 54 building	2 (Can)	12, 13
Under the stair beside the cafeteria	2 (Can)	14, 15
In front of the store beside the cafeteria	1 (Can)	16
Cafeteria	1 (Can)	17
Entrance of the cafeteria	3 (Can)	18~20
Underground passage of 56-57 building	2 (Can: 1, Cup: 1)	21, 22
In front of the company store	2 (Can)	23, 24
Underground entrance of 57 building	2 (Can)	25, 26
Smoking lounge of 60 building	1 (Can)	27
Underground entrance of 65 building	1 (Can)	28
Beside the tennis court	1 (Can)	29
Total	29 (Can: 24, Cup: 3, Pack: 2)	

5．4．1　特殊 IC タグによる運用情報取得のシミュレーション

（1）シミュレーション方法

自販機の稼動状態を解析することを目的に，2003 年 6 月より既販のデータロガーを用いた自販機のモニタリングを行ってきた．これらの蓄積したデータを基にして，自販機モニタリングにおいて特殊 IC タグの使用を想定したとき，現在の記録情報（電流・温度）によって稼動状況が，どの程度把握可能であるかを缶自販機を例に検討した．モニタリング対象とした自販機の仕様 Table 5.14 における No.19 である．

本研究では，以下の 3 つの稼動状況を判断することを目的とした．

- HOT 商品の販売の有無
- 深夜停止機能の発現の有無
- ピークカット機能の発現の有無

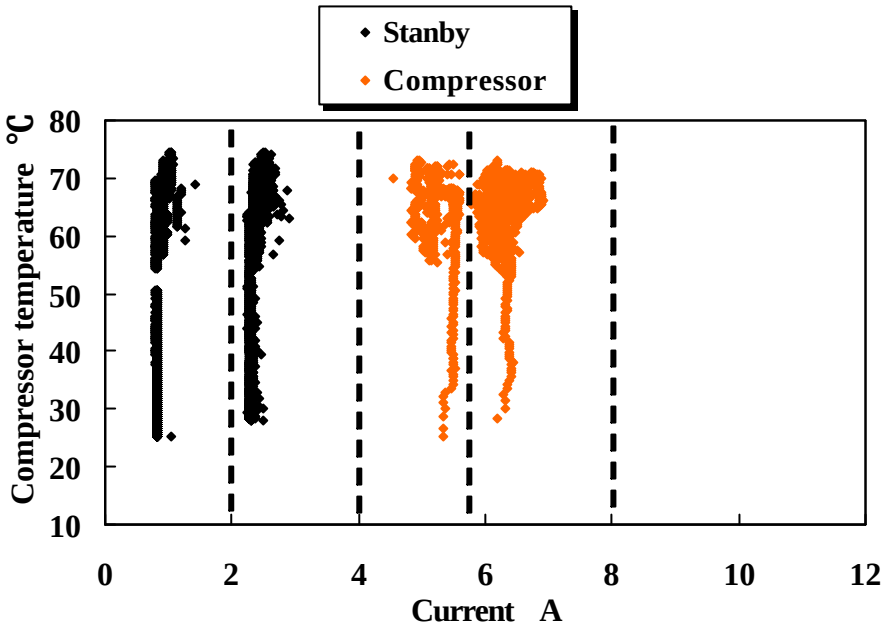
HOT 商品の販売の販売の有無は，消費電力量に大きく影響する．また，深夜停止やピークカットは自販機の省エネ運転において重要な役割を担っているために選定した．なお，対象とした期間は 2003 年 7 月 7～21 日，9 月 16～30 日とした．

ここでは，1 日毎にタグからデータを取得すると仮定し，電流と温度の累積運転時間を調査対象とした．電流・温度のデータを分類するにあたって，基本となるデータの 1 例として，HOT 販売開始前後の 9 月 25，27 日の電流と圧縮機表面温度の関係を Fig.5.22 に示す．同図（a）は 9 月 25 日のデータで，COLD

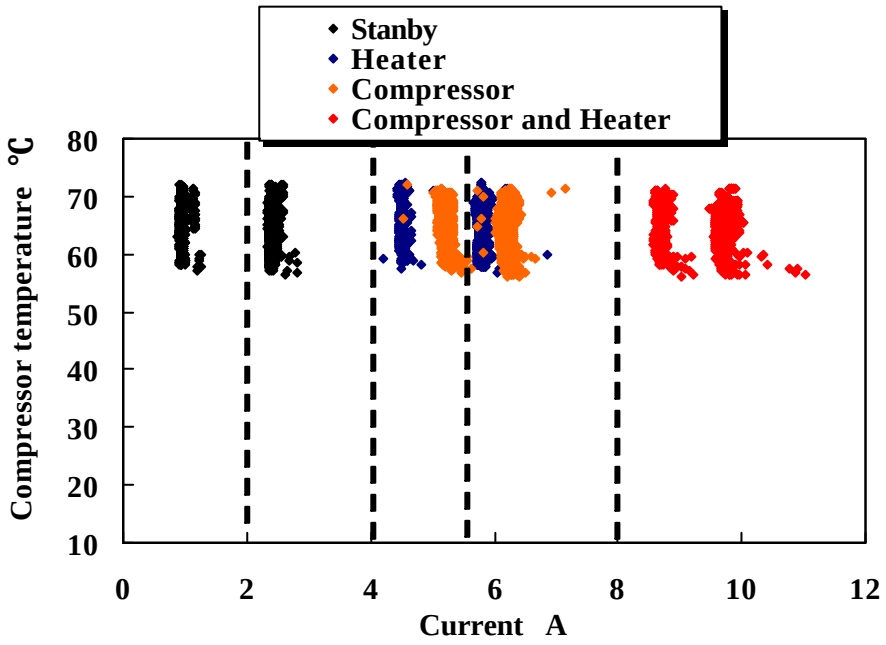
のみ販売しているときのデータである．同図（b）は HOT 飲料の販売開始後のもので，8.0A 以上のプロットが見られる．これは，圧縮機とヒータが同時に稼動しているため，電流値が大きくなっている．また，同形状のプロットの集団が，1.0～2.0A ずれて存在しているのがわかる．これは照明の ON／OFF に伴う電流値の変化に起因している．また，圧縮機表面温度が 55℃以下になっているのは，圧縮機の深夜停止もしくはピークカットによるものである．

以上の結果を基に，電流レンジの設定方法を検討した．タグのデータ記録状況に合うように，電流値を 5 つに分類すると Table 5.15 のようになる．これらの電流範囲は実際にモニタリングした電流値を参考に決定したものである．これらの範囲は自販機の稼動に大きな変化をもたらした HOT 販売の開始前後においても，大きな変動は見られなかった．この様子は Fig.5.22 で確認できる．

ただし，同表に示した電流の境界値によって，完全に全ての稼動状況が分類できるものではない．5.7A 付近では，照明が ON であるにも関わらず電流値が 5.7A 以下であったり，照明が OFF で 5.7A 以上であったりすることもある．このような例外も存在するが，ここでは傾向の把握が目的なので無視できるものとする．温度レンジの設定は，圧縮機が長時間止まっているかどうかわかるように考慮した．55℃以下が深夜停止やピークカットの状態で，通常状態はほとんど 60～75℃の範囲におさまる．以上により，温度レンジは Table 2.16 のように決定した．



(a) Before “HOT” sale (September 25, 2003)



(b) After “HOT” sale (September 27, 2003)

Fig. 5.22 Difference of current between comperessor temperature

Table 5.15 Current range and operating conditions of vending machines

Current range A	Condition
0～2.0	Lights; “OFF” , Comperassor and Heater; “OFF”
2.0～4.0	Lights; “ON” , Comperassor and Heater; “OFF”
4.0～5.7	Lights; “OFF” , Comperassor or Heater; “ON”
5.7～8.0	Lights; “ON” , Comperassor or Heater; “ON”
8.0～	Comperassor and Heater; “ON”

Table 5.16 Temperature range and operating conditions of vending machines

Temperature range ℃	Condition
0～55	Compressor stop (more than 1 hour)
55～60	Compressor stop
60～65	Normal operation (Most of the data classified here)
65～70	
70～80	

（2）シミュレーション結果

自動販売機の稼動状況を，深夜停止機能，ピークカット機能の発現の有無および HOT 販売の有無によって，Table 5.17 に示すように分類した．特殊 IC タグ記録情報である電流値および温度よりこれらの条件が判別できれば，自動販売機の稼動状況が把握可能であるといえる．

Fig.5.23 は対象期間で，各条件に合致する日の各電流レンジに相当する平均稼働時間をとったものである．

同図に示すⅠ～Ⅳと Table 2.12 より，以下の運転パターンが確認できる．

Ⅰ：8.0A 以上は，HOT 商品が販売されている．

Ⅱ：2.0A 以下（深夜の待機状態）の時間が短いので，深夜も稼動している．

Ⅲ：2.0A 以下（深夜の待機状態）の時間が長いので，深夜停止している．

Ⅳ：2.0～4.0A（昼間）の時間が長いので，ピークカットがあった．

ただし，各条件の値は平均値であることに注意する．Ⅰ～Ⅲは顕著に傾向が現れるが，Ⅳについては日によって判別が難しいため，温度による判断に頼る．

Fig.5.24 は対象期間で各条件に当てはまる日の各温度レンジに相当する平均稼働時間をとったものである．Fig.5.24 のⅤ～Ⅶと Table 5.17，さらに深夜停止は 4 時間半，ピークカットは 2～3 時間続くことを考慮すると，以下の運転パターンが確認できる．

Ⅴ：深夜停止とピークカットが両方とも働いた．

Ⅵ：深夜停止のみ働いた．

Ⅶ：ピークカットのみ働いた．

Table 5.17 Classification of conditions

Conditon	①	②	③	④	⑤
Midnight stop	?	?	×	×	×
Peak cut	?	×	×	×	(HOT sale)

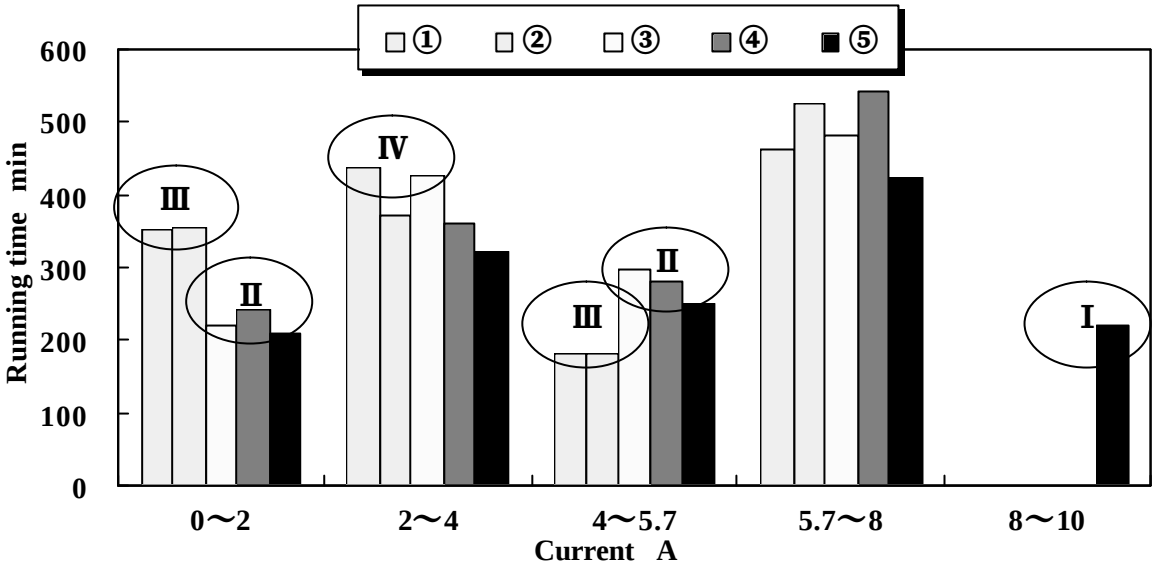


Fig. 5.23 Running time of respective current range

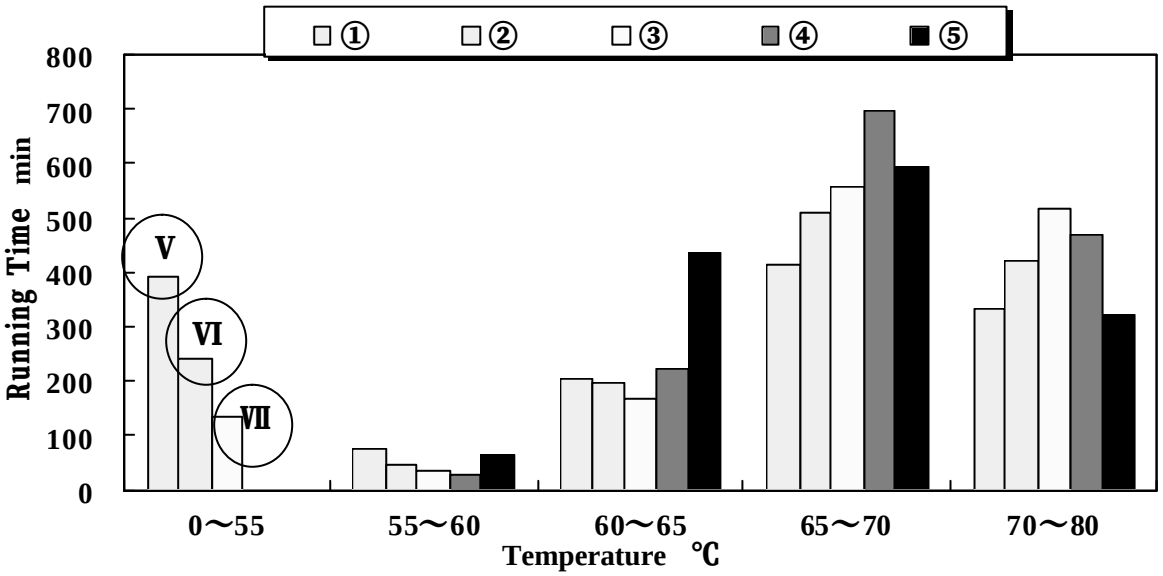


Fig. 5.24 Running time of respective temperature range

（3）自販機における運用情報管理システムの有効性

以上の結果より，特殊 IC タグを用いることによって，「HOT を販売しているか」「深夜停止は起こったか」「ピークカットは働いたか」が判別できることを確認した.

ただし，今回の電流や温度範囲の設定は自販機固有の値である．照明や圧縮機･ヒータの出力や形状が変われば電流や圧縮機表面温度も変わってくるので，

他の自販機には当てはまらないことになる．しかし，自販機の稼動状況の傾向把握は，電流・温度レンジの設定を変更することで可能であると考えられる．さらに，圧縮機表面温度だけでなく，HOT 飲料の制御をしているサーミスタ付近の温度を計測できれば，ヒータの稼動状況も把握することが可能となる．

5．4．2　自販機の省エネルギー診断

運用情報を管理することにより，省エネルギー診断が可能となる．本項では，大久保キャンパスを例にその省エネルギー効果を検討する．

（1）運用情報の取得方法および診断方法

特殊 IC タグシステムおよび既存のデータロガーを用いて，モニタリングを行った．電流値の計測を基本とし，対象の自販機によって周囲温度や庫内温度を記録した．測定期間は，自販機ごとにそれぞれ設定したが，診断の効率化のため，1～2 週間の短期計測を行うことを基本とした．

記録したデータを基に，設置環境に応じた最適な運用方法を検討した．具体的には，照明の点灯時間や各種省エネ機能の設定などを実施した．

（2）調査結果

これまで述べてきたように，全ての自販機において，搭載されている省エネ機能が有効に活用されていないことが明らかとなった．省エネ設定を施していない自販機は学習省エネ機能に依存した運転を行っている．学習省エネ機能とは，過去の売れ行きなどを基に制御し，最適運転を自動的に行う機能である．調査対象とした自販機の運用状況を確認したところ，全体として以下のような傾向がみられた．

- 設置場所によらず 23～5 時は蛍光灯を調光している．
- 屋内に設置されている自販機は，圧縮機の深夜停止機能が発現している．
- 屋外に設置されている自販機は，光を感知して日中は不定期に消灯している．

これらを利用時間帯等の設置場所に併せた運用を行うことで，運用の効率化が実現できると考える．

（3）省エネ設定および省エネ効果の検証

省エネ診断をより効率的に行うため，「設置場所の認知度」を考慮した省エネ設定マニュアルを作成し，省エネ診断手法を体系的に整理した．

例えば，自販機が学校やオフィスビルなど特定の敷地内にあれば「認知度が高い」とし，路地などの人目につきづらく往来の少ない場所を「認知度が低い」として判断する．「認知度が高い」と判断した場合，照明の設定は調光を適用した． これをもとに，調査対象の 29 台中の 25 台に対しそれぞれ設置環境に合った設定を検討したところ，Table 5.18 のような 6 つの Case に分類された．

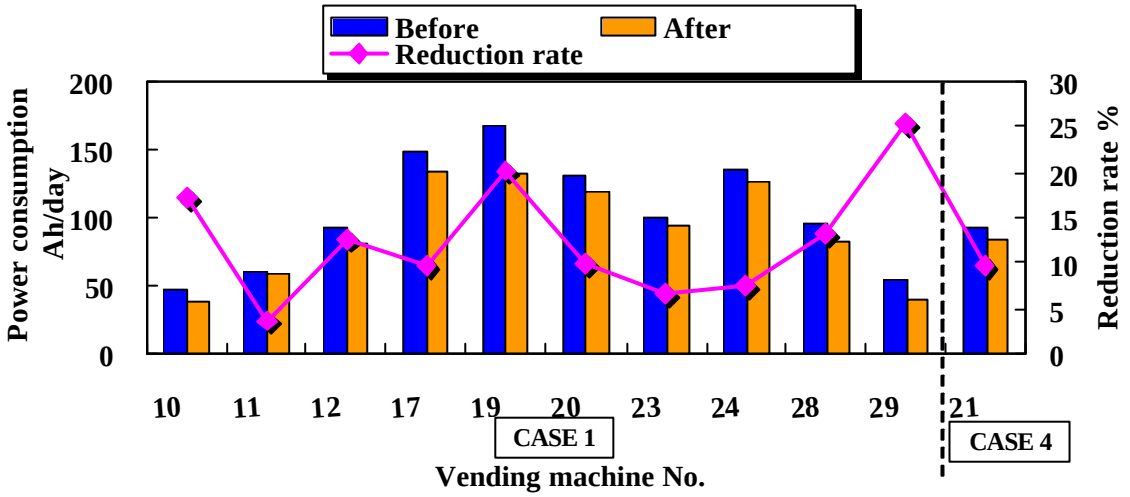
省エネ設定を施した 25 台の自販機の設定前後の消費電力量を比較した結果を Fig.5.25 に示す．自販機によって差が生じているが，総じて効果が得られる結果となり，平均で．12.2%の削減率を達成した．これを CO_2 排出量に換算すると，年間あたり CO_2 を約 3.9t-CO_2 削減できるという結果となった．ただし，ここでは，消費電力量の CO_2 排出量原単位を 0.378kg-CO_2/kWh（地球温暖化対

策の推進に関する法律施行令）として試算している．

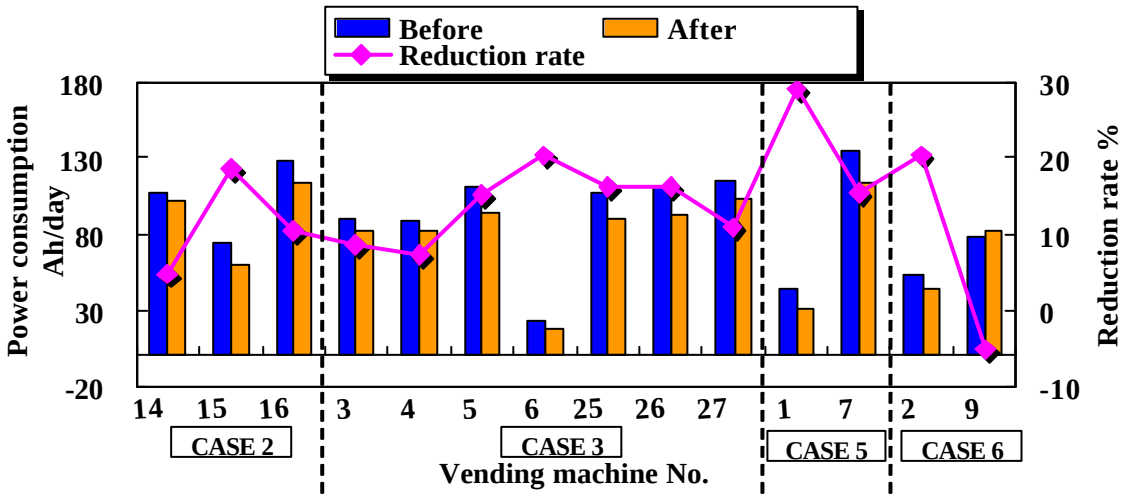
以上のように，運用情報の管理と既存の機能を組み合わせることによって，効率的な省エネルギー化が実現できることを示した．

Table 5.18 The cases of energy-saving setting for each located situation

No.	Check point	Case					
		1	2	3	4	5	6
1	Well-known location	?	?	?	?	?	?
2	The light of daytime is enough	×	?	×	×	×	×
3	The night time is not available	?	×	×	?	×	?
4	Container type	Can	Can	Can	Cup	Cup	Pack



(a) Multiple mesure (CASE 1, 4)



(b) Only setting of lighting (CASE 2, 3, 5, 6)

Fig.5.25 Effect of energy saving

5．4．5　E2-PA による運用段階の LCA

第 3 章で示した E2-PA は，製品の環境負荷評価のみならず，こうした自販機の運用段階のサービス等を対象とすることが可能である．また，LCA 的な観点から評価することにより，省エネルギー性のみならず，様々な観点から運用上の問題点を抽出することが可能となる．そこで，自販機の運用段階に着目した E2-PA による環境負荷評価を行った．

（1）評価範囲

評価範囲としては，自販機の運用段階のみとし，自販機の製造・廃棄工程における環境負荷は無視した．ここでは，自販機の仕様に伴う消費電力，飲料容器の製造・廃棄にかかわる環境負荷，補充により発生する輸送時の環境負荷を評価対象とした．評価範囲を Fig.5.26 に示す．

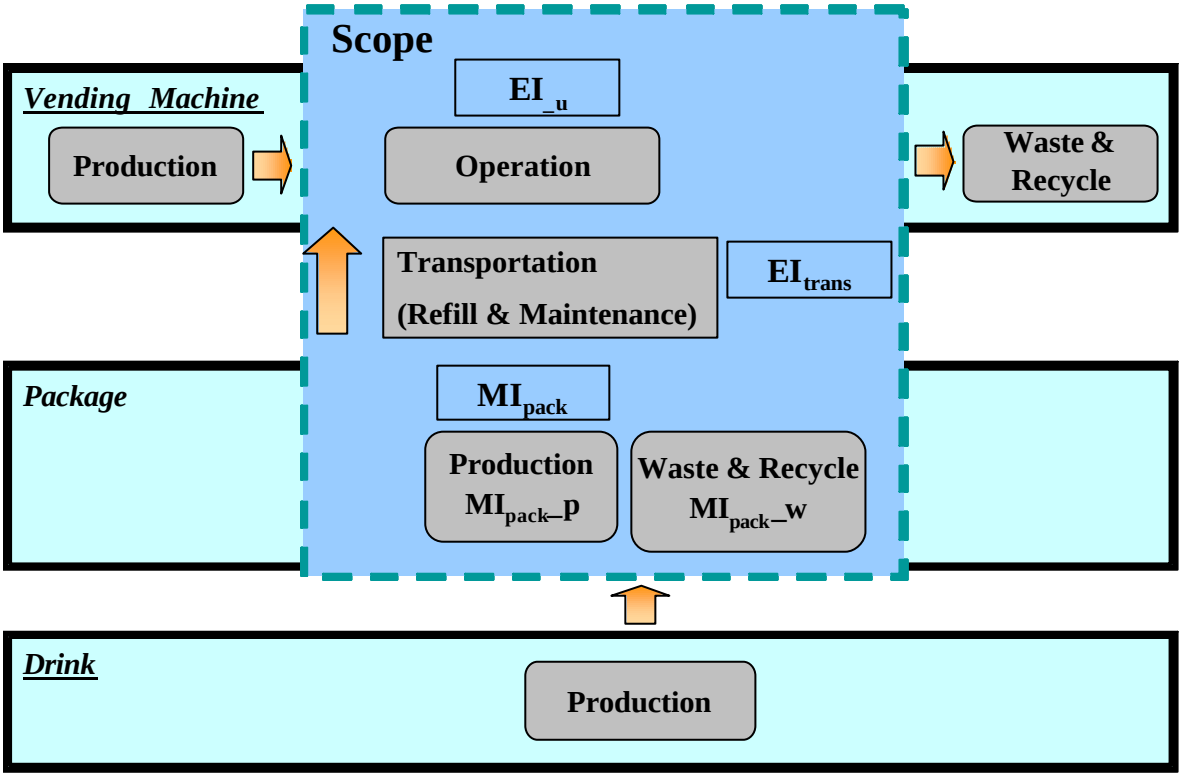


Fig.5.26 Scope for LCA of vending machine operation

（2）各資源強度の定義と算出方法

（a）消費電力の資源強度（$EI_{\_u}$）

実測データに基づく各自販機の月間消費電力量を算出し資源強度換算原単位（Table 3.3）を乗算したものを電力の資源強度とする．

$$EI_{\_u} = P_e \times ei_e \qquad (5.11)$$

ここで，$EI_{\_u}$：消費電力量に起因する資源強度[kg/y/Month]

P_e：月間の消費電力量[kWh/Month]

ei_e：電力の資源強度換算原単位[kg/y /kWh]

（b）容器の製造・廃棄に伴う資源強度（MI_{pack}）

容器に関しては製造から廃棄までを評価範囲とし，文献 [73] を基に，各容器の資源強度を算出した．容器種類ごと詳細な販売実績は不明なため，飲料容器の質量割合から缶飲料，パック飲料を代表とする資源強度を作成した．PET については容量により 500ml と 280ml の 2 種類に分類した．これらに各自販機の月間売上本数を乗算することにより，容器の資源強度を算出することが可能である．

$$MI_{pack} = \sum_{x}(mi_{pack\,x} \times N_{s\,x}) \tag{5.12}$$

ここで，MI_{pack}：容器の製造・廃棄に伴う資源強度[kg/y/Month]

mi_{packx}：容器 x の資源強度換算原単位[kg/y/Number]

N_{sx}：容器 x の月間あたりの販売本数[Number/Month]

（c）補充の際の輸送に伴う資源強度（EI_{trans}）

輸送時の環境負荷は，各自販機の月間平均補充回数にヒアリング調査から算出した資源強度換算原単位を乗算することにより求めた．資源強度換算原単位は，飲料メーカーやオペレーターが管理する自販機の作業台数や車両の燃費から自販機 1 台の 1 回の商品補充にかかる投入資源量より求めた．

$$EI_{trans} = \frac{D}{FN_{v}} \times ei_{lo} \times n \tag{5.13}$$

ここで，EI_{trans}：補充等の輸送に伴う資源強度[kg/y/Month]

D：当該車両の月間の総走行距離[km/Month]

F：輸送車両の燃費[km/L]

N_v：管理対象の自販機の台数[Number]

ei_{lo}：軽油の資源強度換算原単位[kg/y/L]

n：月間の補充・メンテナンス回数[Number/Month]

（3）評価結果

各工程で算出した資源強度を合計したものを Fig.5.29 に示す．どの自販機でも容器の割合が多いことから，売上の多い自販機では大きい値を取っている．EI_u の値が小さいもののほとんどは売上が多いものとなっており，MIpack が小さいものは紙容器の飲料を販売しているものとなっている．EItrans が大きいものは過剰補充を行っていると判断できる．

また，売上の異なる自販機に対しても一律に評価を行うために，求めた資源強度を月間売上本数で割った飲料 1 本あたりの資源強度を算出した．これをロケーションごとで平均したものを Fig.5.30 に示す．売上に対して過剰な設置が見受けられるロケーション「憩いの広場(Open space “Ikoi”)」，「54 号館階段下(Undergroud of 54 building)」，「食堂入口(Entrance of cafeteria)」などは大きな値をとっていて，売上が多いロケーション「ラウンジ(Lounge)」，「購買部前(In front of company store)」，「生協入口(Underground entrance of 57 building)」については小さい値を取っている．これによりこの飲料 1 本あたりの資源強度を把握することによって，環境効率上，有利な適正設置の判断が可能であるといえる．

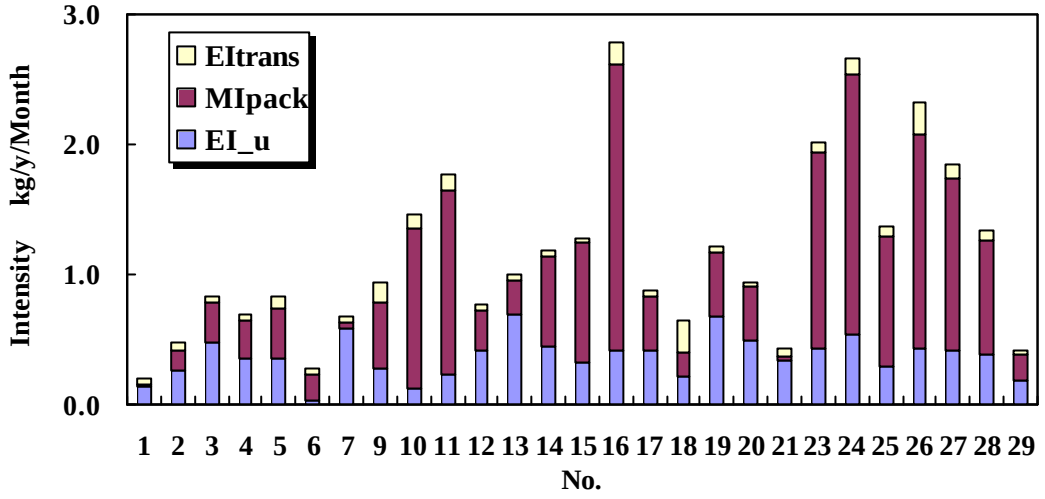


Fig.5.29 Intensity of each vending machine

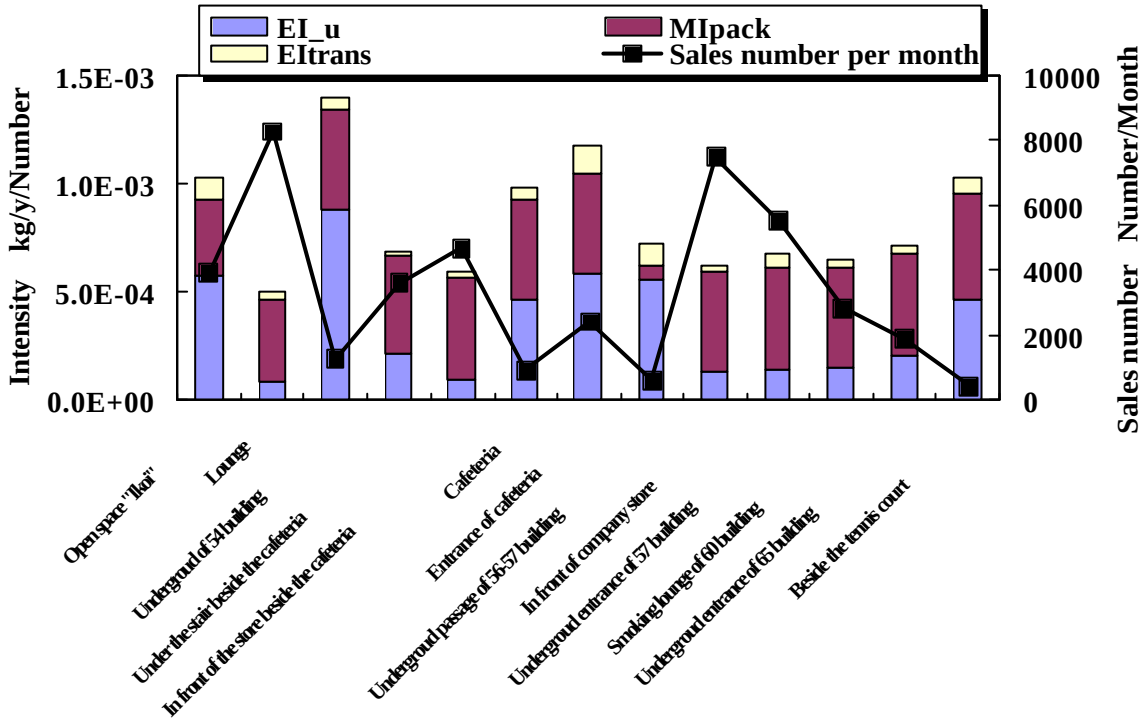


Fig.5.30 Intensity of each vending machine per monthly sales number

5．4．3　消費電力量の予測式の構築

（1）重回帰式の構築

自販機の消費電力量は，製品の仕様（定格消費電力，表面積，冷媒種類等）はもちろんのこと，省エネ機能（オート調光，深夜停止，ピークカット等）の有無および発現頻度や設置環境における周囲温度や日射量などの外乱の影響も大きく関係する．さらに，売上本数を検知して運転制御を行っていることから売上状況および商品の補充の頻度なども影響すると考えられ，これも一種の外乱であるといえる．また，Hot 飲料の販売の有無によっても消費電力量は大きく変動することが知られている．

しかしながら，現状では，運用段階における消費電力の変動の要因が明確に検討された事例はない.

そこで，重回帰分析により，これらを定量化することを試みた．具体的には，実測した消費電力量を目的変量にとり，上記の要素を説明変量とした重回帰式の構築を試みた．すなわち，

$$P = f\,(w_1, w_2, w_3, \cdots x_1, x_2, x_3, \cdots y_1, y_2, y_3, \cdots z) \tag{5.14}$$

ただし，P：消費電力量[Ah]

w_n：自販機の仕様に関する要素

x_n：省エネ機能に関する要素

y_n：外乱影響に関する要素

z_n： Hot 飲料の販売に関する要素

という仮説に基づき，重回帰分析を行った.

説明変量の選定にあたっては，多重共線性の影響を考慮し，お互い相関が強い要素が重複しないように配慮した．また，説明変量の中には，「照明の設定の有無」や「設置場所（屋内もしくは屋外）」など 0，1 で定量化する必要がある要素が存在する．こうした項目は，自販機の容量によって省エネ効果が異なってくるが，重回帰式は 1 次式であることから，その影響が算出結果に現れてこない．そこで，容量によって省エネ効果が異なる要素に関しては，容量を現す変数によって重み付けを行い，その影響を考慮した.

以上により，選定した説明変量の一覧を Table 2 に示す．同表には，各々の変量の単位および重み付けの有無も併せて示している．自販機の容量を現す重み付け係数に関しては，セレクション数，表面積，定格消費電力の採用を検討したが，最も重回帰式の精度が高くなった表面積を採用した．得られた重回帰式は，Eq.(2)のようになる.

$$\begin{aligned} P = {} & A_1 w_1 + A_2 w_s w_2 + A_3 w_s w_3 + A_4 w_s w_4 + A_5 w_s w_5 + A_6 w_s w_6 + A_7 w_s w_7 \\ & + A_8 w_s x_1 + A_9 w_s x_2 + A_{10} w_s x_3 + A_{11} y_1 + A_{12} y_2 + A_{13} y_3 + A_{14} y_4 + A_{15} y_5 \\ & + A_{16} y_6 + A_{17} y_7 + A_{18} y_8 + A_{19} z + B \end{aligned} \tag{5.15}$$

ここで，An：偏回帰係数　B：定数

なお，各説明変量の対応に関しては，Table 2 を参照されたい.

以上の重回帰式を用いて予測した消費電力量と実際の消費電力量の関係を示したのが Fig.5.31 である．若干のばらつきはあるものの高い相関が得られており，消費電力量の予測式として有効であるといえる.

（2）重回帰式による感度解析

求めた重回帰式によって，外乱などの影響によりどの程度消費電力量が変化するかを考察した．パラメータとしては，周囲温度，売上・補充量，省エネ設定の有無とした．パラメータとした変量以外の条件については，JIS B 8561[74] に定められた条件に倣うものとした．さらに，早稲田大学大久保キャンパスにおける条件に適合させた場合についても試算した．また，セレクション数の違いによる影響も併せて検討した.

算出結果を Fig.5.32 に示す．JIS では，周囲温度 15℃で試験を行うように規

定されている．同図では，このときを基準にして，増加率を示している．この結果から，周囲温度の平均が 25℃となると，消費電力量は，約 20%増加する．また， JIS 規定の 5 倍の売上を計上しているロケーションが実際にあったことから，その影響も試算したところ，売上 5 倍で約 5%増加するという結果となった．実測したロケーションでは，その他の外乱の影響もあり，30～40%の増加していることがわかった．このように，設置環境による消費電力量の変化の影響は無視できないといえる．

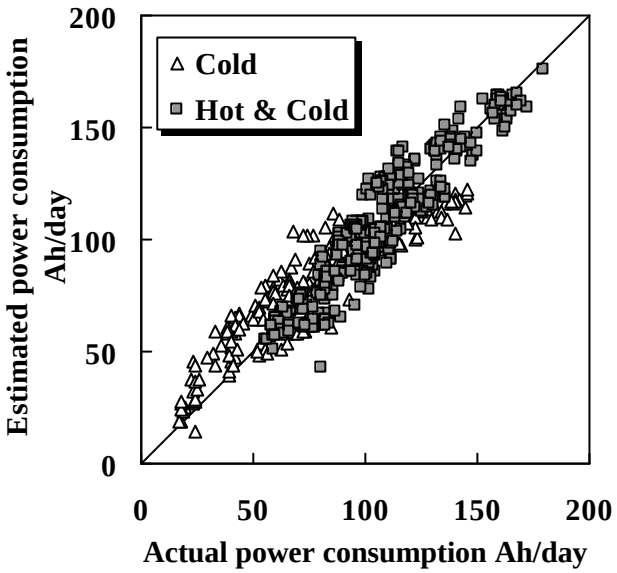


Fig. 5.31 Relation between actual power consumption and estimated power consumption

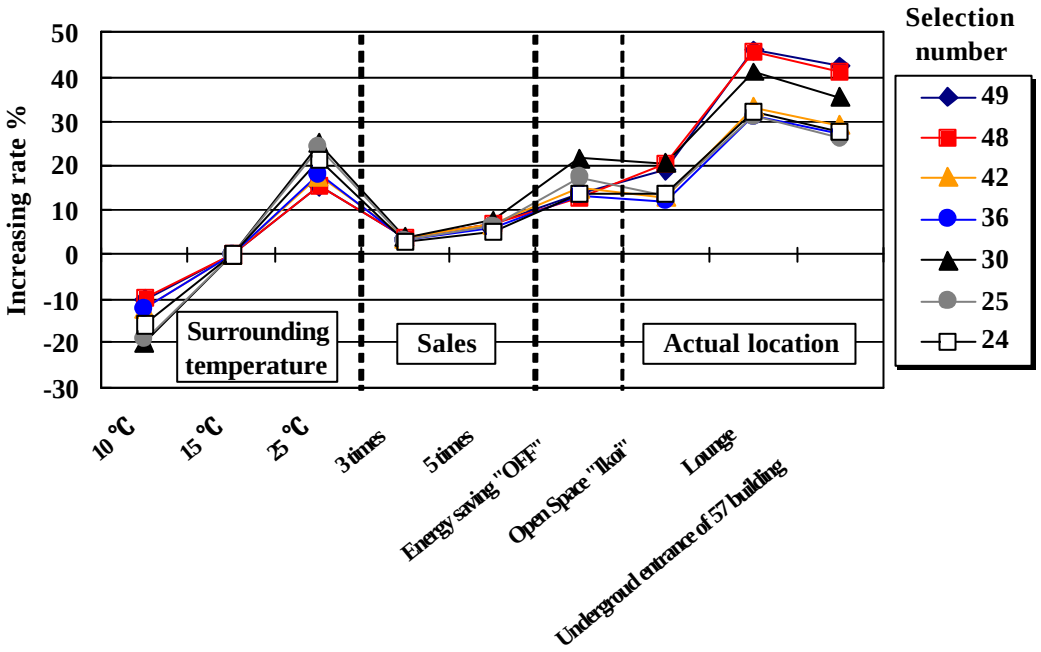


Fig. 5.32 Sensitive analysis results of power consumption by multiple analysis equation

Table 2 Explanatory variables in the liner multiple regression model for estimating power consumption

Classification	Explanatory variable	Nomenclature	Unit	Weighting factor w_s
Specification	Selection number	w_1	Selection number	-
	Manufactured date	w_2	Years ago (from 2004 models)	?
	A company	w_3	0 or 1[*1]	?
	B company	w_4	0 or 1[*1]	?
	C company	w_5	0 or 1[*1]	?
	R407C	w_6	0 or 1[*1]	?
	R-22	w_7	0 or 1[*1]	?
Energy saving function	Peak cut	x_1	hour	?
	Midnight stop	x_2	hour	?
	Lighting setting	x_3	0 or 1[*1]	?
Environment influence	Surrounding temperature	y_1	℃	-
	Sales	y_2	Number	-
	Supplement number	y_3	Number	-
	Precipitation	y_4	mm	-
	Wind velocity	y_5	m/s	-
	Humidity	y_6	%	-
	Sunlight	y_7	MJ/m^2	-
	Placement (Outside or Inside)	y_8	0 or 1 (Outside: 1)	?
Hot drink sales		z	Selection number	-

*1: The case “correspond” is “1”.
*2: Weighting factor: Surface area [m^2]

5．4．4　配置の適正化による省エネルギー効果

売上状況に応じて，自販機の容量，台数を最適化することによって，より省エネルギー化が図れると考える．そこで，先に導出した重回帰式を用いて早稲田大学大久保キャンパスを例に設置の最適化に関する検討を行った．

（1）前提条件

検討を行うにあたって，以下のような前提条件を設定した．

- 売上については，早稲田大学大久保キャンパスにおける実績値（月間売上）を使用した．売上は，ロケーションごとで管理されており，個別の自販機の売上が不明な場合がある．その際は，セレクション数にしたがって，売上が分配されるものとした．
- 1 日の売上が収容本数の過半数を超える場合は，冷やし込みが十分行われない可能性がある．そこで，売上の上限を最大収容本数の 3 分の 1 と設定した．
- 本検討では，1 ヶ月あたりの消費電力量で比較を行うが，1 ヶ月あたりの売上本数は，実績値を基に決定した．
- 自販機の配置変更する際には，設置幅が制限要因になることがある．そこで，設置幅を現状より小さくするという前提で消費電力量が最小となる自販機を求める．

・ 自販機は，セレクション数の異なる 9 種類の自販機（12，18，20，24，25，30，35，36，42）の中から選定するものとした.

（2）算出結果

Fig. 5.33 では，横軸に売上を縦軸に消費電力量を示しており，算出した推奨消費電力量と現状の大久保キャンパスにおける消費電力量を示している.なお，同図におけるバブル面の大きさは，設置幅を意味する．この結果から，大半のロケーションでは，最小消費電力量に沿っているものの 3 つのロケーションでは，最小消費電力量を大きく上回っていることがわかる.

Fig.5.34 は，横軸に設置幅，縦軸に予測消費電力量，バブル面に月間売上をとったものである．同図では，問題があった 3 つのロケーションにおいては，自販機の移動や削減によって大幅な消費電力量が可能であることがわかる．一方,「ラウンジ(Lounge)」では，月間売上が 8000 本を超えており，容量が不足している．したがって，自販機の増設・もしくは大型化が必要であることがわかる.

Fig.5.35 に売上に応じた最適配置を行った場合の消費電力量の削減率を示した．同図からもわかるように,「憩いの広場(Open space “Ikoi”)」,「54 号館階段下(Undergroud of 54 building)」,「カフェテリア入口(Entrance of cafeteria)」では，自販機の過剰な設置が見受けられ，50%以上の削減率が達成できることがわかる．また,「ラウンジ(Lounge)」では，現状では自販機の台数が不足していることから，逆に容量の大きい自販機への置き換えあるいは増設が必要であるとの結果が得られた.

以上の結果を総合し，大久保キャンパス全体でどの程度の削減効果があるかを試算した．また，これまで示した結果は，省エネ設定を行わないという条件で行ったが, 省エネ設定を適切に行った場合の試算も行った. その結果, Fig.5.36 に示すように, 省エネ設定を行うだけで, 約 12%, 最適配置を行うことで約 30%の削減効果があることがわかった．省エネ設定の削減率は，筆者らの実測データと一致しており，重回帰式の有効性が確認できる．また，両者を併せて実施することで，約 40%の消費電力量の削減が達成できるという結果となった．このことは，最新の省エネ型自販機を導入することなく，運用の高度化を図ることで達成可能であることを意味している.

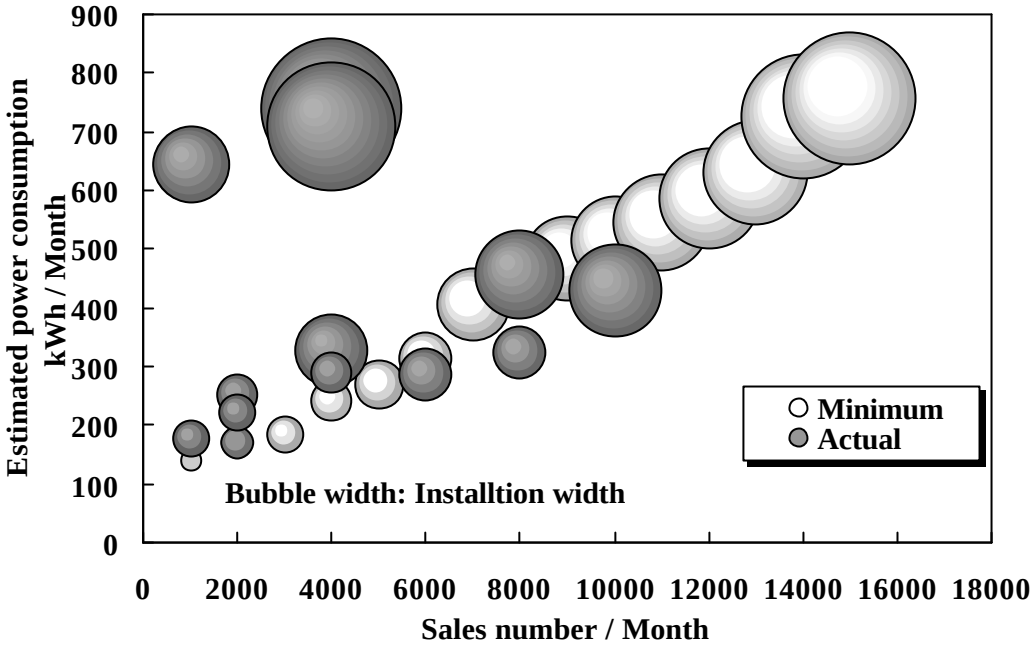


Fig. 5.33 Relation between sales number and estimated power consumption

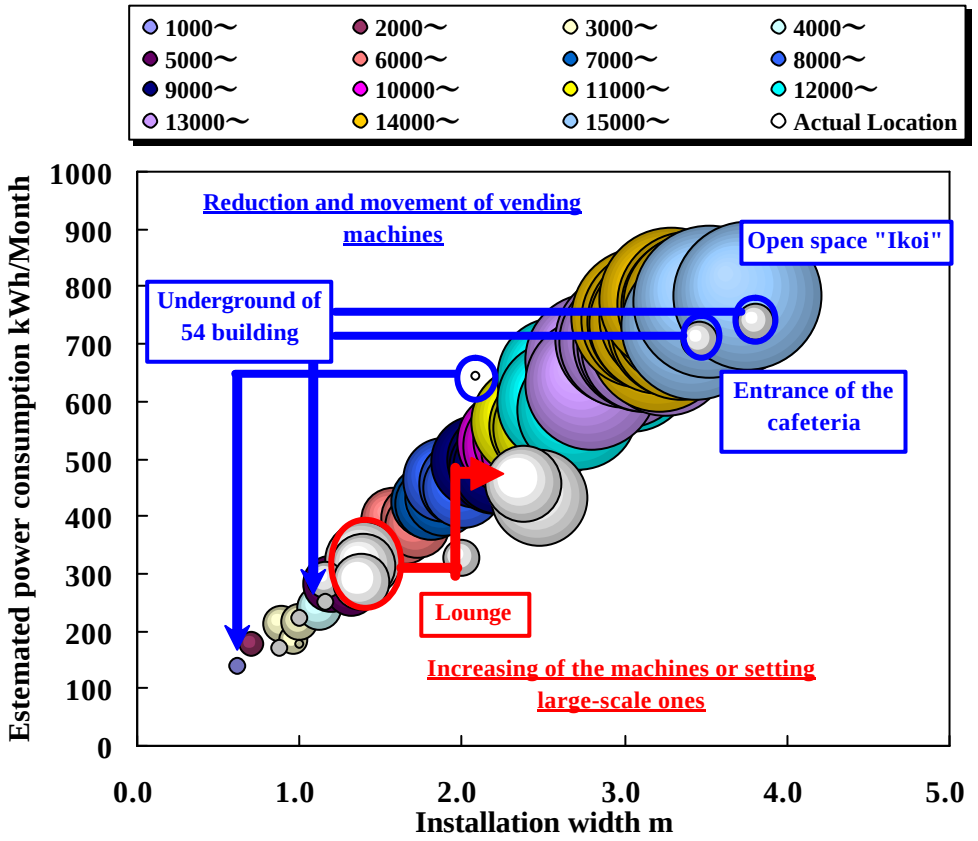


Fig. 5.34 Relation between installtion width and estimated power consumption

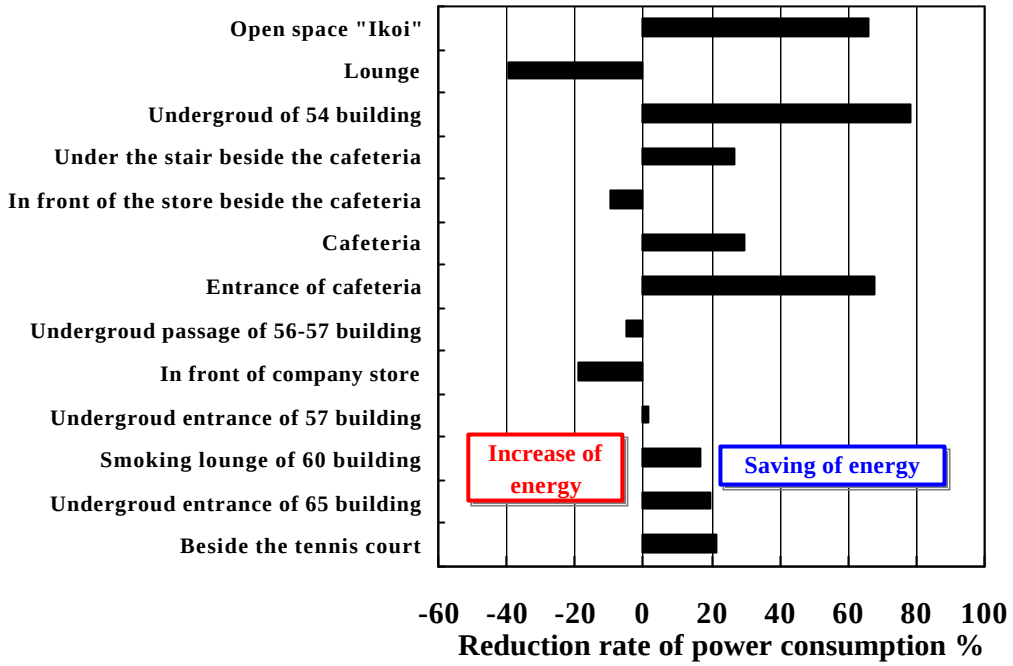

Open space "Ikoi"
Lounge
Undergroud of 54 building
Under the stair beside the cafeteria
In front of the store beside the cafeteria
Cafeteria
Entrance of cafeteria
Undergroud passage of 56-57 building
In front of company store
Undergroud entrance of 57 building
Smoking lounge of 60 building
Undergroud entrance of 65 building
Beside the tennis court
Increase of energy
Saving of energy
-60 -40 -20 0 20 40 60 80 100
Reduction rate of power consumption %

Fig. 5.35 Reduction rate of power consumption at each location by optimization

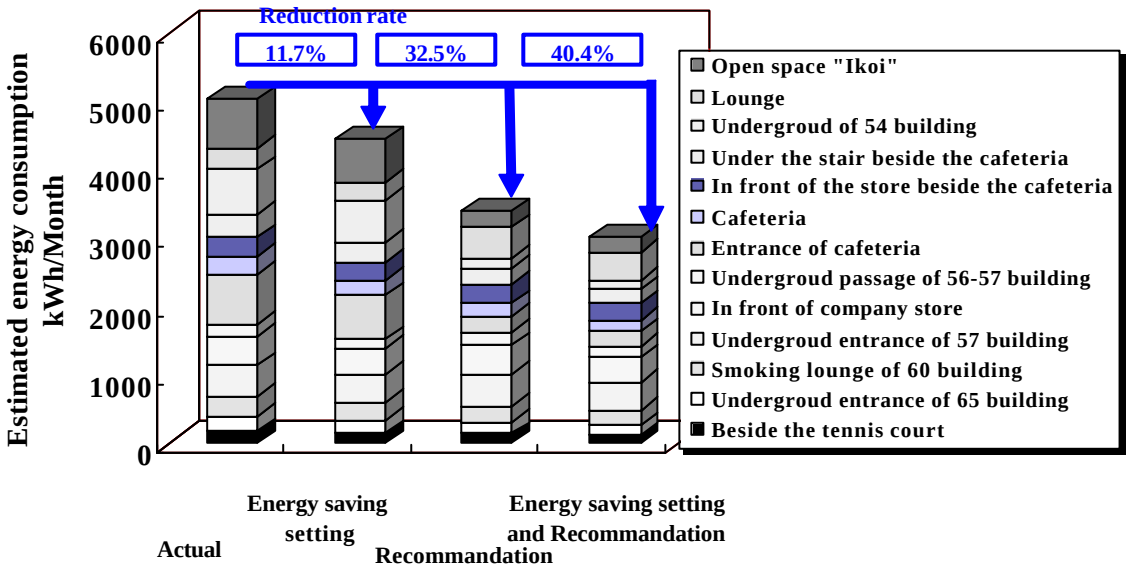


Fig. 5.36 Total reduction rate of power consumption at Okubo campus, Waseda University by operational optimization

5．5　まとめ

第 5 章では，製品のライフサイクル管理を実現する特殊 IC タグシステムを開発するとともに，その有効性を示すことを目的とした．とりわけ，運用段階における運用・保守管理の効率化，省エネルギー診断による環境負荷削減効果を定量的に示すことを目的に，汎用ポンプ，自販機を例として取り上げた検討を行った．

1）運用管理を目的とした特殊 IC タグシステムの開発

製品固有の情報に加え，運転時間，起動停止回数，電流，温度等の機器の運用情報を収集・蓄積が可能な特殊 IC タグ，特殊 IC タグと微弱無線により交信を行う RW のハードウェアおよびソフトウェアを設計・試作した．

2）運用情報管理システムの開発

運用情報を管理することの有効性を省エネ診断，性能劣化の把握，異常検知，使用履歴の予測という観点から，汎用ポンプを例に検討した．また，他の機器への応用例として，自動販売機を取り上げ，本システムの有効性を示すことを試みた．さらに，特殊 IC タグで記録した運用情報を効率的に管理するソフトウェアの開発を行った．

- 特殊 IC タグにより，運用情報を容易に収集できること，運転パターンの把握が可能となり，従来の省エネ診断のプロセスが大幅に効率化されることを示した．また，一般集合住宅の運転をシミュレーションに再現することにより，運転条件の違いが特殊 IC タグ記録情報に反映されることを確認した．
- 性能劣化や異常状態を実験的に再現したところ，電流値の変化が見られ，特殊 IC タグ記録情報によりその傾向把握が可能であることを示した．
- 実際に工場で稼動しているポンプに特殊 IC タグを取り付け，実証試験を行った．本試験を通し，特殊 IC タグシステムの運用情報の記録機能の有効性を確認した．また，短期間の記録データからでも特殊 IC タグに記録した製造年や 1 日あたりの運転パターンから，該当ポンプの使用履歴が予測できることを示した．
- 特殊 IC タグ記録情報の集計を行い，長期あるいは短期のデータを管理する情報管理ソフトウェアを開発した．
- 他の製品への応用例として，自動販売機を例として取り上げ，運用情報管理システムの適用可能性を検討した．その結果，特殊 IC タグ記録情報である電流や温度によってその運転状態が判断できることを確認した．

3）自動販売機の運用の高度化

早稲田大学大久保キャンパスに設置された 29 台の自販機を対象に，その運用の高度化に関する検討を行った．

- 特殊 IC タグ記録情報である電流や温度によって，自販機の運転状態が判断できることを確認した．

- **簡易的な診断に基づき，照明の設定や深夜停止などの既存の機能を有効活用することにより，約 12%の省エネ効果があることを，実測値を基に示した.**
- **E2-PA によって，運用段階に着目した LCA を実施したところ，省エネのみならず，容器や商品補充に伴う環境負荷を把握でき，売上情報と連携することで，環境効率の観点から現状の運用状態が把握可能であることを示した.**
- **実測した自販機の運用情報と製品の仕様から実運用における自販機の消費電力量を予測可能な重回帰式を構築した．それにより，様々な感度解析を実施したところ，実際のロケーションでは，JIS 規格に基づく試験によって得られる消費電力量より 20～30%増加していることが判明した.**
- **売上に応じて，最適な自販機の容量，台数を配置することによって，約 30%の消費電力量が削減できることがわかった．さらに，利用可能時間帯に応じた省エネ設定を併せて行うことにより，合計で約 40%の省エネ効果が得られることを示した.**

第 6 章

結論および今後の展望

第 6 章　結論および今後の展望

6. 1　結　論

本研究では，利便性・標準性の高い環境配慮設計の定量評価手法を確立するとともに，製品のライフサイクル管理を実現する環境情報管理システムの構築とその応用による運用管理の高度化を実現することを目的として各種の検討を行った.

以下に本研究で得られた知見を整理する.

1）易解体性定量評価手法の開発

- 環境配慮設計において, 重要な要素である易解体性に着目した評価手法として, 分解評価指数を提案した. 分解性評価指数は, 結合種類, 結合点数, 部品点数など製品の設計時点で入手可能なデータから製品の解体時間を予測することが可能な指標である.
- 電子・事務機器, 家庭用ミシン, 手動車いすなどの解体解析を提案する分解性評価指数によって行い, 易解体設計の提案を行った. ネジの本数の削減, ネジの視認性の向上, ユニット化などが共通の課題として挙げられる.
- 家庭用ミシンは, 電子・事務機器や家電製品とは異なり, 結合が解除できない, 部品が取り外せないといった根本的な構造上の問題点を有していた. 圧入による結合やネジの上からのコーティングを回避するなどの配慮により, 主要な部品を分離可能とすることが望ましい. さらに, 細かい部品のユニット化を図ることも解体作業の効率性や単一素材化への観点から重要である.
- 手動車いすは, 本研究で対象とした他の製品と比較すると, ネジの締付けトルクが大きいなどの理由により, 一結合あたりの結合解除に時間を要するという特徴があった. また, 使用段階における機能追加や部品変更を考慮しているモジュール型車いすでは，結合方法の簡易化が図られており, 解体性に優れていることを確認した. 車いすの解体性の向上には, 新製品であるフルモジュール型に採用されている結合方法を採用し, ユニット分離の容易化を図ること, 結合方法を外側からに統一すること, グリップや樹脂部品のように, 寿命や素材の異なる部品の分離の容易化を図ることが重要である.
- 以上の各種工業製品の解体解析で得られた解体データを統計的に分析することで，解体データによって製品の類型化が可能であることを示した. さらに, 設計段階で入手可能なデータのみで, 製品ごとの特徴を考慮した指数の決定方法を提案した. 20 種類の製品を対象に分解性評価指数を算出したところ, 実解体時間との相関が得られ, 解体時間を予測する手法として，分解性評価指数が有効であることを確認した.
- 製品の解体フローと 3D アニメーションを連携させ，製品の分解・分別工程の高効率化を支援する解体支援ソフトウェアを開発した. 本ソフトウェアは, 製品の設計段階で入手可能な情報（部品名, 結合点数, 部品点数等）

を入力することで製品の解体フローを作成することができる．また，解体フローと連携して，3D アニメーションによって製品の解体手順を視覚化することを可能としており，環境配慮設計の評価支援ツールだけでなく，解体現場におけるマニュアルとしての活用も期待できる．

2）環境負荷評価手法の開発

- 従来の LCA 手法の問題点を改善し，利便性の向上を図った環境負荷評価手法として環境効用ポテンシャル評価手法（Eco-Efficiency Potential Assessment Method, E2-PA）を開発した．E2-PA では，環境効率の概念とポテンシャル評価の 2 つの概念を基礎においている．環境効率の概念の導入により，環境への影響を減少しつつ人々のニーズに答え，かつ生活の質を向上できるような製品やサービス等を提供するための指針を得ること，ポテンシャル評価によって，従来の LCA の煩雑性を排除し，評価の利便性を実現することが可能となった．
- E2-PA では，環境負荷を資源強度として統合化する．従来の LCA において統合評価を行う上で避けられなかった主観的価値観による重み付けを排除し，評価実施者に依存しない一貫した評価が可能である．
- E2-PA における効用は，製品等の有する性能・機能のうち，消費者の立場から考えた最も本質的なものを定量表現したものである．本研究では，「製品の市場価格は効用を表しているのではないか」という考え方に基づき，効用を市場価格に換算する手法を提案した．デスクトップ型パソコンを例に，効用の評価例を示し，従来の LCA ではなしえなかった機能単位，適応技術の異なる製品の比較評価が可能であることを具体的に示した．また，効用の要素の感度解析を行うことで新しい製品開発への指針が得られることを，デスクトップ型パソコンを例に示した．
- E2-PA による統合評価を，ノート型パソコンを例として行った．これにより，環境効率という観点から，製品の環境負荷，効用の両面を効果的に評価可能であることを示した．

3）環境配慮型汎用ポンプの設計とその評価

- ライフサイクルあたりの環境負荷の低減を指向した環境配慮型汎用ポンプを開発・試作した．ステータ Assy，ロータ Assy を分離可能としたこと，ポンプ軸と電動機軸を分離し，磨耗部品であるポンプ軸の交換を容易としたこと，電動機フランジや軸に JIS 規格品を採用することにより汎用性を持たせた構造としたこと，上記により，発展的な構造変更を可能とし，「“成長”する製品」の概念を導入したこと等の改善を施した．
- 設計の改善効果を確認するために，電動機に着目した解体試験を行ったところ，環境配慮型電動機では，ステータ Assy やロータ Assy などほとんどの部品が分解可能であることを確認した．また，分解性評価指数による評価では，環境配慮型電動機は従来型電動機と比較して，約 20%の改善がみられた．

- 分解・リサイクル工程に着目した環境負荷評価を行ったところ，環境配慮型汎用ポンプの導入により，従来型ポンプの再生販売を行うケースと比較して，約 36%の環境負荷の削減効果があることを示した．
- 電動機の性能向上を例に，“ 成長 ” 製品のコンセプトを具現化し，その効果を示した．

4）特殊 IC タグを用いた運用情報管理システムの開発とその高度化

- 製品固有の情報に加え，運転時間，起動停止回数，電流，温度等の機器の運用情報を収集・蓄積が可能な特殊 IC タグ，特殊 IC タグと微弱無線により交信を行う RW のハードウェアおよびソフトウェアを設計・試作した．これにより，製品と情報が一体となったライフサイクルの管理が可能となる．
- 特殊 IC タグの記録情報に基づき，製品の適切な運用管理を行うことで，環境負荷の低減を図る運用情報管理システムを開発した．具体的には，運用情報を管理することの有効性を省エネ診断，性能劣化の把握，異常検知，使用履歴の予測という観点から，汎用ポンプを例に検討し，その有効性を確認した．さらに，特殊 IC タグで記録した運用情報を効率的に管理するソフトウェアの開発も併せて行った．
- 運用情報管理システムを自販機に応用し，その運用の高度化に関する検討を早稲田大学大久保キャンパスに設置された 29 台の自販機を対象に行った．既存の省エネ機能の有効活用による省エネ効果，E2-PA を利用した環境効率の観点に基づく評価事例を示した．また，運用情報と製品の仕様に関する情報から，実際のロケーションにおける自販機の消費電力量の予測式を構築した．それにより，売上数に応じて，最適な容量，台数の自販機を配置することにより，現状より約 30%の消費電力量が削減可能であることをシミュレーションにより示した．さらに，省エネ設定を適切に行うことにより，合計で約 40%の削減可能である．

環境配慮設計に関しては，メーカーの内部でその評価は行われているものの，消費者向けに十分な情報公開が行われていないのが，現状である．本研究で提案した分解性評価指数， E2-PA のような手法によって，製品評価を積極的に行い，その情報を開示していくことが環境配慮設計の普及・促進に寄与すると考える．また，ライフサイクル管理システムは，環境配慮型社会の高度化に行うにあたって，拡大生産者責任（EPR）の観点から重要なコンセプトであると考える．本研究で対象とした汎用ポンプや自販機は，あくまでもその一例であり，各種の製品においてその特徴に応じて，こうしたライフサイクル管理を行うことが期待される．

6．2　今後の展望

本論文では，工業製品を例とした検討事例を中心に述べたが，近年の環境問題への行政，事業者，市民の関心の高まりから多方面への展開が考えられる．

6．2．1　環境配慮設計の定量評価手法について

（1）易解体性定量評価手法

本研究で，開発した分解性評価指数は，様々な種類の製品に対して横断的に適用できるという点に特徴がある．近年，各メーカーによる環境配慮設計への取り組みがなされているものの統一的な判断基準はなく，消費者の意思決定に活用できるような状況ではない．そこで，こうした評価手法を活用した製品の環境配慮設計に関する情報開示が進展することが期待される．また，本研究で開発した解体支援ソフトウェアは，そのままの形で各種の製品への応用が可能である．その活用方法としては，①解体作業現場における情報支援ツールおよび②製品設計者の環境配慮設計評価支援ツール等が挙げられる．前者に関しては，メーカーが作成している解体マニュアルが有効に活用されていないという実態があることから，それを本システムによって作成し，WEB 上で容易に入手するようなシステムを構築することが有効であると考える．これによって，必要な情報を円滑に伝達することが可能となる．また，後者に関しては，設計者が，製品情報を入力することにより，結合方法や部品配置などの解体性の観点から確認することができ，環境配慮設計の推進に貢献できる．

さらに，従来の製品だけでなく，ハイブリッド自動車，液晶・プラズマなどの薄型テレビのような新しいカテゴリーの製品，あるいは海外製品に対しても環境配慮設計の導入の必要性も増してきている．こうした製品に対しても本研究で提案した解体支援ソフトウェアを用いることで環境配慮設計への対応を支援することが可能である．

（2）環境負荷評価手法

LCA は，設計・生産現場においては，その重要性が着目されつつあるが，企業内部における限定的な活用にとどまっているのが現状である．E2-PA の開発コンセプトでもあるように，今後は，製品を提供する側（メーカー）とそれを使用する側（消費者）双方にとって有用な活用方法を明らかにしていくことが期待される．メーカー側は，製品の環境配慮に関する情報を対外的に明確に示し，消費者は，その情報を商品選択の判断基準のひとつとして活用するという仕組みが必要になる．こうした情報提供を行うツールとして，本論文で提案した E2-PA は，有効に活用できる可能性を有している．とりわけ，消費者の意向を取り込んだ製品の効用の評価は，環境効率における分子の要素としてだけでなく，新しい製品開発へのフィードバック，マーケティングや適正価格診断などの営業分野での活用など様々な展開が考えられる．

このように，手法の合理性・利便性を理解した上で，E2-PA の普及促進を図っていくことが次のステップとなる．

6．2．2　LCA の応用について

LCA によって得られる環境負荷に関する定量的な情報は，設計・生産現場における製品評価のみならず，様々な場面で求められてきている．今後の展開としては，社会システムの検討・改善にあたっての指標としての活用や消費者のライフスタイルに起因する環境負荷を評価する手法としての応用が期待される．

前者の例としては，都市の廃棄物マネジメントにおける政策判断への適用が挙げられる．資源循環型社会の高度化に向けて，様々な資源循環技術が開発されてきているが，筆者らは，こうした技術に対して LCA を適用する TLCA（Technology Life Cycle Assessment, TLCA）手法を提案している．さらには，LCA によって，その環境負荷を把握し，経済性，すなわち，LCC（Life Cycle Costing）と併せて考慮する CLCA（Comprehensive Life Cycle Assessment）が今後の主流となると考えられる．こうした分野にも E2-PA の適用が期待される．

一方，筆者らは，後者の消費者のライフスタイルに起因する環境負荷評価手法を LSA (Life Style Assessment)手法として提案している．LSA とは，PLCA (Product Life Cycle Assessment)と呼ばれる製品そのものを対象とした評価を発展させ，個人の行動に由来する環境負荷を定量的に評価することを試みるものである．Fig.6.1 に，統合化指標 ELP に基づいた LSA ソフトウェアの表示画面の一例を示した．家庭における各種製品の仕様や使用時間を入力することで，個人の行動に起因する環境負荷を算出することを可能としているだけでなく，行動改善による環境負荷削減効果も評価できる仕様となっている．こうした情報を発信することによって，個人のライフスタイルの改善を促すことが LSA のねらいとするところである。今後は，LSA においても環境効率の考え方を導入していくことで手法の高度化を図っていく．

以上のように，市民・行政・事業者に付帯する行動について，LCA によって環境負荷に関する情報を開示・提供していくことで環境配慮型社会の構築に向けた活動を支援することが可能であると考える．

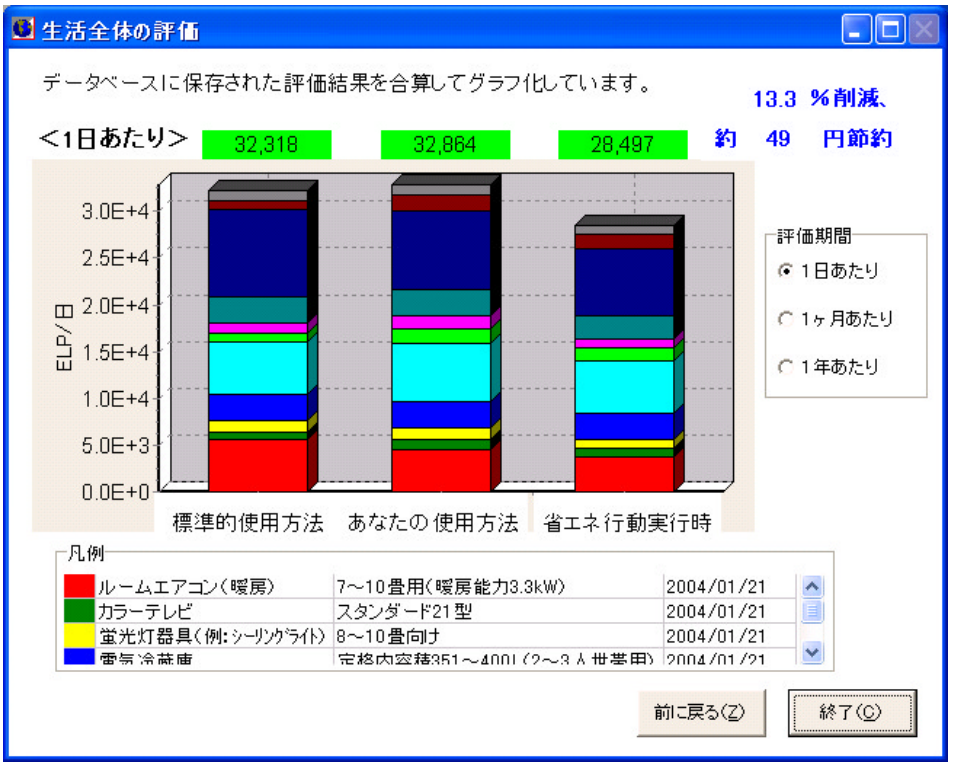


Fig.6.1　Image of LSA (Life Style Assessment) software

6．2．3　環境情報管理システムについて

本研究において，情報管理の媒体として開発した特殊 IC タグシステムは，従来の IC タグの認証機能のみならず，製品の運用情報を定期的に蓄積することが可能な機能を有している．将来的には，こうした一体型のハードウェアを活用していくことが望ましいが，管理対象とする製品によっては，本システムの搭載が経済的な観点から大きな負担になってしまう可能性がある．当然のことながら，本研究で開発した特殊 IC タグシステムの小型化・低価格化は検討していくものの，当面は，用途に応じて機能を分割し，「情報管理システム」としての普及・促進を図っていくことが重要であると考える．

（1）IC タグシステムの活用

IC タグシステムに関しては，その認証技術に着目し，本研究で対象としたような製品のライフサイクル管理に加え，静脈物流分野での活用が期待される．近年，循環型社会の高度化に向けて，広域移動によるリサイクルの重要性が増してきている．こうした中で，不法投棄の防止や安全・安心な処理システムを確立するために IC タグや二次元バーコードを用いた廃棄物の管理システムや GPS による運行管理システムが開発されている．一部では，こうしたシステムが実際に導入され，実証されていはいるものの十分に普及しているとはいえない．そこで，こうした情報管理技術を活用し，一貫した廃棄物処理・リサイクルシステムを構築することが重要であると考える．また，今後は，国内のみならず中国などのアジア圏も含めた資源循環体系を構築しようという試みもあり，その際に情報管理システムによるトレーサビリティは不可欠なものとなる．

（2）運用情報管理システムの応用

運用情報管理システムに関しては，本論文でも省エネルギー診断での活用方法について述べたが，地球温暖化対策への喫緊の取り組みが求められていることから，汎用産業機器のみならず様々な分野での応用が期待できる．近年，電力やガスなどのエネルギーの使用状況を WEB 上で管理できるモニタリングシステムが盛んに開発されているが，現場で簡便に活用できる計測システムは開発されておらず，既存のモニタリングシステムとの連携による本システムの普及が期待される．さらには，需要側の機器単体のみならず，コージェネレーションシステム，冷凍機，ボイラ等のエネルギー供給機器の運用管理ツールとしても活用できると考える．以上の点を包含した包括的なエネルギーマネジメントシステムを図示すると Fig.6.2 のように整理される．

また，本研究でも対象として取り上げた自動販売機については，Fig.6.3 のような展開が考えられる．すなわち，運用情報を管理し，自動販売機の運用に関係する各主体にフィードバックすることによって，環境配慮型の運用管理システムを実現することである．メーカーに対しては，自動販売機の使用実態を通じて得られる知見を基に新しい省エネ機能の提案を行う．運用段階においては，実際に自動販売機の管理・運営を行う飲料メーカーやオペレーターに対し，売上情報や品温等をフィードバックすることで，自動販売機の適正配置の支援が可能となる．さらに，実際に電気料金を支払うロケーション・オーナーに対しては，省エネルギー診断，適正配置によって無駄なエネルギーを削減するため

の情報提供を行うことができる．

その他，新しい交通システムとして注目されているカーシェアリングでの運行管理やエコドライブ支援システムとしての応用，さらには，LSA と連携した家庭向け省エネルギーサービスとしての活用も考えられる．ここでは，省エネルギー分野での活用を中心に述べたが，運用データを蓄積することによって，劣化・故障診断用のツールとしての応用など様々な展開が期待される．

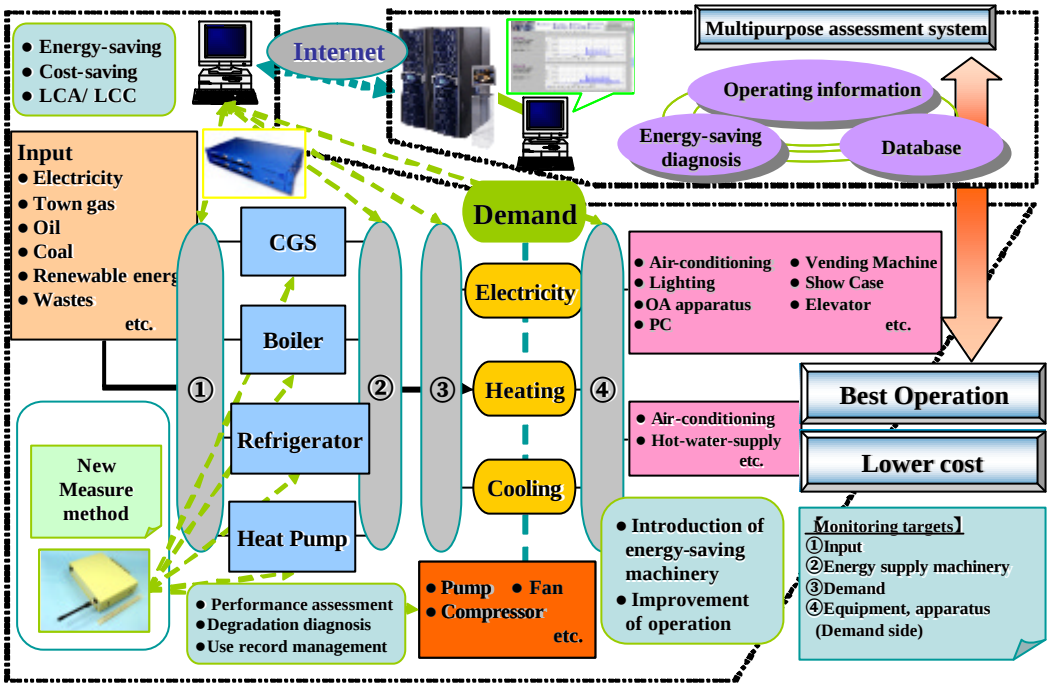


Fig.6.2　Image of comprehensive energy management system

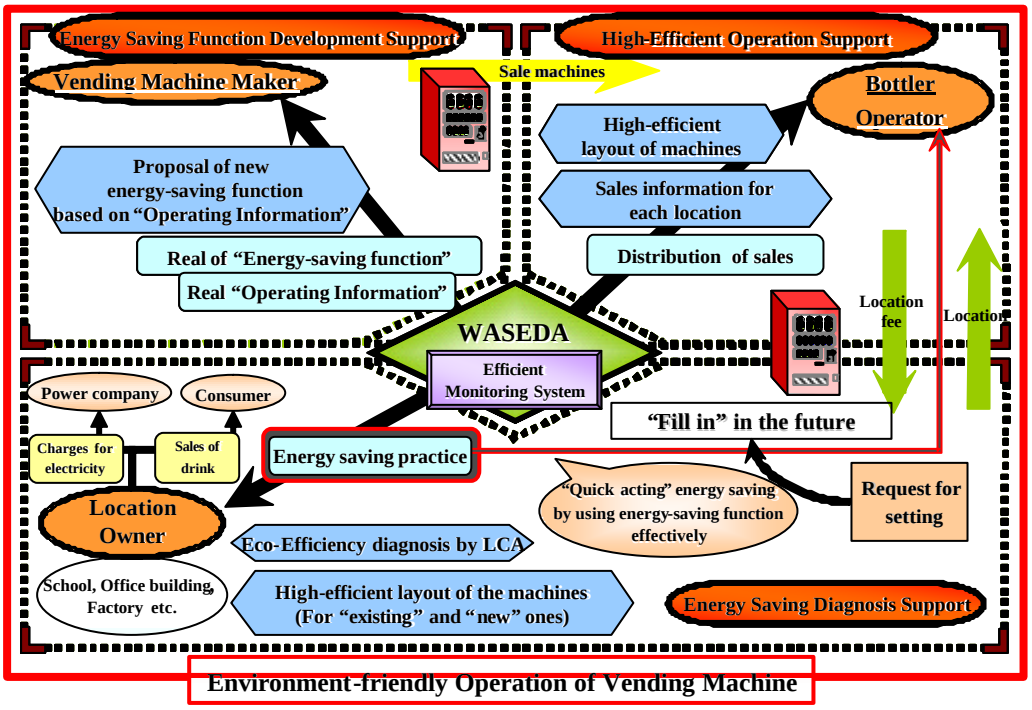


Fig.6.3　Image of Environment-friendly operation system of vending machine

謝辞

本研究を進めるにあたって終始ご指導賜りました早稲田大学理工学部永田勝也教授に厚く御礼申し上げます．本論文をまとめるにあたり，適切なご助言，ご指導いただきました早稲田大学理工学部大聖泰弘教授，勝田正文教授，納富信助教授に深謝致します．また，毎年，研究をともにしてきた早稲田大学理工学部機械工学科永田研究室の皆様には多大なるご協力をいただきました．

本研究の一部は，平成 14，15 年度関東経済産業局地域新生コンソーシアム研究開発事業「汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発」の補助を受けて実施したものです．ご協力いただきました関係各位に厚く御礼申し上げます．

参考文献

1) 永田勝也，元田欽也，環境適合製品設計の手びき，(1998)，オーム社.
2) 市川芳明，環境適合設計の実際，(2001)，オーム社.
3) 原本発行　国連環境計画（UNEP)，翻訳監修　永田勝也，エコデザイン（持続可能な生産と消費のための将来性あるアプローチ)，(2001)，ミクニヤ環境システム研究所（現イーエムエスアイ).
4) 総合科学技術会議環境担当議員，内閣府政策統括官（科学技術政策担当）共編，ゴミゼロ社会への挑戦（環境の世紀の知と技術 2004)，(2004)，日経 BP 社.
5) 監修　永田勝也，（財）クリーン・ジャパン・センター編，製品アセスメントとリサイクル設計事例（自動車　家電製品　OA 機器等)，(1996)，クリーン・ジャパン・センター.
6) クリーン・ジャパン・センター，製品アセスメント一般指導書作成事業報告書（3R に配慮した製品の評価・設計の方法)，(2003)，クリーン・ジャパン・センター.
7) ISO/TR14062, Environmental management-Integrating environmental aspects into product design and development, (2002).
8) IEC Guide114, Environmentally conscious design- Integrating environmental aspects into design and development of electrotechnical products, (2005).
9) 齊藤潔，IEC/TC111/WG2（環境配慮設計）第 1 回 Tokyo 会合の報告，電機，Vol.686 (2005)，2-7.
10) 社団法人日本電機工業会環境技術委員会，シリーズ「わが社の環境配慮製品」総括，電機，Vol.661 (2003)，2-7.
11) 河西啓二，村田善一，製品アセスメントの導入，リサイクル技術研究発表会講演論文集（第 1 回)，（財）クリーン・ジャパン・センター，(1993)，B1-B6.
12) 永田勝也，地球環境問題からみた廃棄物再資源化についての一考察，クリーンジャパン，No.80 (1990)，113-116.
13) 元田欣也，廃棄物の処理容易性について，クリーンジャパン，No.35 (1982)，17-15.
14) エコマテリアル研究会，日本における LCA 研究の現状と将来の課題，(1994)，エコマテリアル研究会.
15) 内藤博，坂本茂實，製品開発における環境影響評価（Ⅱ）（リサイクリングに対する検討）製品廃棄物処理現場からみたパソコン製品設計の問題点，第 2 回廃棄物学会研究発表講演論文集，(1991)，113-116.
16) 弘重雄三，大橋敏二郎，有本象治，分解性評価法の開発，日本機械学会第 5 回環境工学総合シンポジウム講演論文集，(1995)，159-162.
17) 大西宏，寺田貴彦，家庭電化製品に対する分解性評価方法の検討，National Technical Report，Vol.41-No.3，(1995)，285-289.
18) VDI2243, konstuieren recyclinggerechter technischer Prokukte, (1993), Verein deutscher Ingenieure.

19) tec4U, Infoletter 01/02, (2002), tec4U.
20) Boks, C.B., Kroll, E., Brouwers, W.C.J., and Stevels, A.L.N, Disassembly Modeling: Two applications to a 21 Philips Telebision Set, Proccedings of the 1996 IEEE International Symposiumu on Electronics and the Environment, (1996).
21)石川雅紀，赤井誠　監修，日本機械工業連合会　編，富士総合研究所環境・資源エネルギー研究部　著，企業のための LCA ガイドブック，(2001)，日刊工業新聞社.
22)環境庁企画調整局環境研究技術課　監修，環境情報科学センター　編，ライフサイクルインベントリー分析の手引き，(1998)，化学工業日報社.
23)Mark Goedkoop, Renilde Spriensma, The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report (1999), Pre Consultants B.V..
24)A. Braunschweig, Method For Ecobalance (Methodik Fur Oekobilanzen), (1998), Buwal Schriftenreihe Umwelt Nr 297.
25)Bengt Steen, A systematic approach to environmental strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics, (1999), CPM report.
26)永田勝也，嬉野通弥，松田大二，石川雅紀，LCA におけるインパクトアセスメント手法の開発（その 5），日本機械学会第 7 回環境工学総合シンポジウム 97 講演論文集，(1997)，269-272.
27)永田勝也，LCA における統合評価手法の開発，第 2 回エコバランス国際会議講演集，(1998)，136-137.
28)柳澤衛，御園生誠，LCA（ライフサイクルアセスメント）を用いた環境情報開示の新戦略（スウェーデン方式環境ラベルタイプⅢにみる），(2003)，第一法規出版
29)インバース・マニュファクチャリングフォーラム　監修，インバース・マニュファクチャリングハンドブック（ポストリサイクルの循環型ものづくり），(2004)，丸善.
30)経済産業省環境政策課環境調和産業推進室　編，環境立国宣言（環境と両立した企業経営と環境ビジネスのあり方），(2003)，ケイブン出版.
31)Taeko AOE, Household factor X in Japan, Proceedings of The Sixth International Conference on EcoBalance, (2004), 255-258.
32)Kensuke FUSE, Satoshi OIKAWA, Katsuji EBISU, Eco-Efficiency Factor of Personal Computer Utilizing EcoLeaf and LIME, Proceedings of The Sixth International Conference on EcoBalance, (2004), 259-262.
33)東畑透，日産自動車におけるリサイクル設計の取り組み，廃棄物学会誌，Vol.15-No.3(2004)，131-135.
34)上野潔，家電リサイクルとエコデザイン，廃棄物学会誌，Vol.15-No.3(2004)，115-122.
35)家電製品協会，家電製品製品アセスメントマニュアル（第 3 版），(2001).
36)渡辺富夫，複写機におけるエコデザイン，廃棄物学会誌，Vol.15-No.3(2004)，

123-130.
37)クリーン・ジャパン・センター，日本事務機械工業会，製品アセスメントマニュアル作成のためのガイドライン調査報告書（複写機等），(2000).
38)関敏範，PC リサイクルのマテリアルフローについて，廃棄物学会誌，Vol.14-No.3(2003)，129-135.
39)荏原製作所，荏原環境レポート 2001，(2001).
40)産業管理協会，JLCA-LCA データベース 2004 年度 2 版，(2004).
41)日本機械工業連合会，日本産業機械工業会，平成 12 年度産業機械の LCI に関する調査研究報告書（汎用ポンプ・汎用送風機のインベントリ調査事例），(2001).
42)日本機械工業連合会，日本産業機械工業会，平成 13 年度産業機械の LCI に関する調査研究報告書，(2002).
43)日本機械工業連合会，日本産業機械工業会，平成 14 年度産業機械の LCI に関する調査研究報告書，(2003).
44)金子一彦，岡崎春雄，LCA 事例紹介（Hzfree ポンプと MS ポンプの LCA による比較），エバラ時報，No.183 (1999)，59-62.
45)木村幸雄，定道有頂，丸山直樹，加藤征三，LCA 手法による自動販売機の環境負荷解析・評価とエコ改善効果，日本冷凍空調学会論文集，Vol.22-No.1，(2005)，pp.45-54.
46)加藤征三，二階靖樹，丸山直樹，高井秀和，Anugerah WIDIYANTO，小島義正，環境影響統合評価法「ESS-NETS」の提案と工業製品への適用，日本機械学会第 9 回環境工学総合シンポジウム‘ 99 講演論文集，(1999)，pp.360-363.
47)三宅良男，飯島克自，ポンプの省エネ診断システム，エバラ時報，No.184 (1999)，58-65.
48)佐藤良男，高田勉，改訂ポンプ（選び方とシステムの改善），(2001)，省エネルギーセンター.
49)木村文彦，自販機技術総覧，(1998)，恒星社厚生閣.
50)Nobuyuki Teraura, Takashi Saito, Kikuzo Sawada, RFID Application for Recycling System, Proceedings of The fifth International Conference on EcoBalance, (2002), 739-742.
51)永田勝也，納富信，奥谷智也，日比野壮，愛澤政仁，E2-PA による複写機の評価と他の LCA 手法との比較，日本機械学会第 12 回環境工学総合シンポジウム 2002 講演論文集，(2002)，441-444.
52)永田勝也，押尾智英，岡田浩，松原仁志，易解体性を考慮した設計手法の検討（テレビの解体解析とそれに基づく易解体設計の提案），日本機械学会第 10 回環境工学総合シンポジウム 2000 講演論文集，(2000)，180-183.
53)日本機械工業連合会，日本健康福祉用具工業会，平成 12 年度福祉用具ライフサイクルガイドライン策定調査報告書，(2001).
54)永田勝也，納富信，小野田弘士，鹿浜敬文，易解体性を考慮した設計手法の検討（福祉用具の解体解析とそれに基づく易解体設計の提案），日本機械学会第 12 回環境工学総合シンポジウム 2002 講演論文集，(2002)，179-182.

55)田中豊，垂水共之　編，統計解析ハンドブック多変量解析，(1995)，共立出版.
56)矢野恒太郎記念会，世界国勢図会 2002/03，(2002).
57)経済産業省資源エネルギー庁長官官房総合政策課編，総合エネルギー統計平成 13 年度版，(2002).
58)経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部編：平成 13 年度電力需給の概要，(2002).
59)経済産業省経済産業政策局調査統計部編，平成 13 年石油等消費動態統計年報，(2002).
60)日本鉄鋼連盟，鉄鋼統計要覧 2002，(2002).
61)経済産業省経済産業政策局調査統計部編，平成 13 年資源統計年報，(2002).
62)経済産業省経済産業政策局調査統計部編，平成 13 年化学工業統計年報，(2002).
63)プラスチック処理促進協会，石油化学製品の LCI データ調査報告書，(1999).
64)化学経済研究所，基礎素材のエネルギー解析調査報告書，(1993).
65)通商産業省環境立地局編，産業環境ビジョン，(1994).
66)日本機械工業連合会，金属系材料研究開発センター，金属材料産業における LCA 手法に関する調査研究報告書，(1995).
67)産業環境管理協会，新・環境小事典（二訂），(2001)，丸善.
68)グリーン調達調査共通化協議会，グリーン調達調査ガイドライン，(2003).
69)和田安彦，三浦浩之，中野加都子，LCA におけるリサイクルと廃棄物処理・処分の評価手法とその適用，土木学会論文集，No.539/Ⅱ-35，(1996)，155-165.
70)永田勝也，横山豊，奥谷智也，原田洋平，工業製品のエコプロダクションシステムに関する検討（資源強度を用いた環境評価の提案とリサイクル手法の比較），日本機械学会第 11 回環境工学総合シンポジウム 2001 講演論文集，(2001)，433-436.
71)坪島茂彦，図解誘導電動機（基礎から制御まで），(1994)，東京電機大学出版局.
72)中島薫，直結給水ブースタポンプの制御方法，エバラ時報，No.180 (1998)，68-73.
73)容器間比較研究会，LCA 手法による容器間比較報告書（改訂版），(2001).
74)日本規格協会，JIS B 8561 自動販売機-試験方法，(2000).

研究業績

種 類 別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者
論文	環境配慮型汎用ポンプの設計とその評価，廃棄物学会論文誌 Vol.16 No.2 pp.119-129，2005・3，小野田弘士，永田勝也，納富信，永井祐二，高田勉，中務幸正
	特殊ICタグを用いた汎用産業機器の環境負荷情報管理システムの開発とその活用による製品設計‐汎用ポンプを例として‐，環境情報科学論文集 No.18 pp.265-270，2004・11，小野田弘士，永田勝也，納富信，永井祐二
	車いすの解体解析と易解体設計の提案，日本生活支援工学会誌 Vol.4 No.1 pp.19-28，2004・10，小野田弘士，永田勝也，納富信，松永紀之
	易解体性を考慮した設計手法の検討（第2報,家庭用ミシンの解体解析とそれに基づく易解体設計の提案），設計工学 Vol.39 No.1 pp.32-39，2004・1，小野田弘士，永田勝也，納富信
	易解体性を考慮した設計手法の検討（第1報,各種工業製品の解体解析とそれに基づく易解体設計の提案），設計工学 Vol.38 No.12 pp.648-654，2003・12，小野田弘士，永田勝也，納富信
	Development of Eco-Efficiency Potential Assessment Method, International Conference Eco-Efficiency for Sustainability, 2004・4, Hiroshi ONODA, Katsuya NAGATA, Makoto NOHTOMI, Masahito AIZAWA
講演	Environmental-friendly Technology for Production and Operation System of Industrial Machines, Proceedings of The Sixth International Conference on EcoBalanace, pp.307-310, 2004・10, Hiroshi ONODA, Katsuya NAGATA, Makoto NOHTOMI, Yuji NAGAI, Tsutomu TAKADA, Tsuneo HAYAKAWA, Sadao KANAI
	早稲田大学大久保キャンパスにおける自動販売機の運用実態とその改善による省エネルギー，2005年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集 A313-2-1-4，2005・10，小野田弘士，永田勝也
	汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発（第7報：自動販売機への応用の検討），日本機械学会第14回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集 pp.487－490，2004・7，永田勝也，納富信，小野田弘士，新見大，石崎尚武，山崎寛之
	汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発（第6報：環境情報システムの開発），日本機械学会第14回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集 pp.483－486，2004・7，永田勝也，納富信，永井祐二，小野田弘士，新見大，石崎尚武，山崎寛之，高田勉，早川恒夫，金井貞夫

種 類 別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者
講演	汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発（第 5 報：汎用ポンプの解体解析と環境配慮型汎用ポンプの開発），日本機械学会第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集 pp.479－482，2004･7，永田勝也，納富信，小野田弘士，永井祐二，深津祐介，佐藤広治，新見大，切川卓也，小川智勇，石崎尚武，山崎寛之，高田勉，中務幸正 汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発（第 4 報：特殊 IC タグの開発とその実証試験），日本機械学会第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集 pp.475－478，2004･7，永田勝也，納富信，小野田弘士，永井祐二，新見大，石崎尚武，山崎寛之，高田勉，中島薫，早川恒夫 分解性評価指数の開発，日本機械学会第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集 pp.439－442，2004･7，永田勝也，納富信，小野田弘士，深津祐介，佐藤広治，切川卓也，小川知勇 環境効用ポテンシャル評価手法の開発（製品の効用に関する検討と E2-PA ソフトウェアの開発），日本機械学会第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集 pp.443－446，2004･7，永田勝也，納富信，小野田弘士，日比野壮，秦健宏，小野田哲也，愛澤政仁 環境効用ポテンシャル評価手法の開発（有害物質資源強度 HI の作成），日本機械学会第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集 pp.447－450，2004･7，永田勝也，納富信，小野田弘士，日比野壮，秦健宏，小野田哲也，愛澤政仁 環境配慮型汎用ポンプの開発，第 14 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 2003 pp.137-139，永田勝也，納富信，小野田弘士，秦健宏，新見大，永井祐二，高田勉 特殊 IC タグを活用した汎用ポンプの環境配慮生産・運用技術の開発，第 14 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 2003 pp.134-136，永田勝也，納富信，小野田弘士，秦健宏，岩尾洋平，永井祐二，高田勉，中島薫，早川恒夫 環境負荷評価による汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の有効性の検討，第 14 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 2003 pp.131-133，永田勝也，納富信，小野田弘士，秦健宏，岩尾洋平，永井祐二，高田勉，中務幸正 汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発（特殊 IC タグを活用した環境情報システムの開発とその有効性の検討），第 12 回日本エネルギー学会大会講演要旨集 pp.452-453，2003・7，小野田弘士，永田勝也，納富信，岩尾洋平，秦健宏，永井祐二，高田勉，中島薫，中務幸正，早川恒夫，金井貞夫 汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発（第 3 報：環境負荷評価による環境情報システムの有効性の検討），日本機械学会第 13 回環境工学総合シンポジウム 2003 講演論文集 pp.398－401，2003･6，永田勝也，納富信，小野田弘士，秦健宏，岩尾洋平，永井祐二，高田勉，中務幸正

種 類 別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者
講演	汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発（第 2 報：環境配慮型ポンプの設計手法の検討と 3R 情報管理システムの開発），日本機械学会第 13 回環境工学総合シンポジウム 2003 講演論文集 pp.394－397，2003･6，永田勝也，納富信，小野田弘士，秦健宏，岩尾洋平，永井祐二，高田勉，中務幸正，金井貞夫 汎用産業機器の環境配慮型生産・運用技術の開発（第 1 報：特殊 IC タグの開発とその記録情報の有効性の検討），日本機械学会第 13 回環境工学総合シンポジウム 2003 講演論文集 pp.390－393，2003･6，永田勝也，納富信，小野田弘士，秦健宏，岩尾洋平，永井祐二，高田勉，中島薫，早川恒夫 易解体性を考慮した設計手法の検討（車いすの解体解析），第 13 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 pp.140－142，2002・11，永田勝也，納富信，小野田弘士，鹿浜敬文，松永紀之 “成長”する製品の概念の提案（中古 PC と介護用ベッドを例に），環境科学会 2002 年会一般講演・シンポジウムプログラム pp.22-23，2002・9，永田勝也，納富信，小野田弘士 易解体性を考慮した設計手法の検討（車いすの解体解析とそれに基づく易解体設計の提案），日本機械学会第 12 回環境工学総合シンポジウム 2002 講演論文集 pp.183－186，2002･7，永田勝也，納富信，小野田弘士，鹿浜敬文，松永紀之 易解体性を考慮した設計手法の検討（福祉用具の解体解析とそれに基づく易解体設計の提案），日本機械学会第 12 回環境工学総合シンポジウム 2002 講演論文集 pp.179－182，2002･7，永田勝也，納富信，小野田弘士，鹿浜敬文，松永紀之 易解体性を考慮した設計手法の検討（家庭用ミシンの解体解析），第 12 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 pp.186－188，2001・10，永田勝也，納富信，松原仁志，小野田弘士 易解体性を考慮した設計手法の検討（各種工業製品の解体解析），第 12 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 pp.183－185，2001・10，永田勝也，納富信，松原仁志，小野田弘士 易解体性を考慮した設計手法の検討（家庭用ミシンの解体解析とそれに基づく易解体設計の提案），日本機械学会第 11 回環境工学総合シンポジウム 2001 講演論文集 pp.277－280，2002･7，永田勝也，松原仁志，小野田弘士 易解体性を考慮した設計手法の検討（各種工業製品の解体解析とそれに基づく易解体設計の提案），日本機械学会第 11 回環境工学総合シンポジウム 2001 講演論文集 pp.273－276，2002･7，永田勝也，松原仁志，小野田弘士